



Vulnerabilidad y caracterización hidrogeoquímica de las aguas subterráneas de la Cuenca del Arroyo San Pedro y Cuenca del Arroyo de la Caballada, San Pedro, Colonia

Bach. María Virginia Strambini Ruiz

Tutora: Dra. María Paula Collazo

Trabajo de Grado
Licenciatura en Geología
Facultad de Ciencias – Universidad de la República
2023

AGRADECIMIENTOS

A mi familia que durante la carrera me ofrecieron su apoyo incondicional.

A mi tutora Dra. Paula Collazo por su guía, paciencia y consejos brindados para ser posible mi tesis.

A la Cooperativa Agraria Suplementada San Pedro (CASSPE) por la financiación y al equipo que colaboró y brindó su tiempo para la realización de tareas de campo: Ing. Agr. Pedro Sorhouet, Ing. Agr. Marianela Vignolo, Ing. Agr. Emiliano Errecarte, Ing. Agr. Pablo Lluberas e Ing. Agr. Federico Geymonat.

A la BC. Paulina Pizzorno por su contribución en trabajos de campo.

Al Lic. Sebastián Pérez por su tiempo para orientarme con el software *QGIS*.

ÍNDICE

RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	2
2. OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo general	3
2.2 Objetivos específicos.....	3
3. METODOLOGÍA.....	3
3.1 Etapa de gabinete I	3
3.2 Trabajo de campo.....	3
3.3 Tareas de laboratorio	4
3.4 Etapa de gabinete II	4
4. ÁREA DE ESTUDIO.....	5
4.1 Ubicación y vías de acceso.....	5
5. CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS Y BALANCE HÍDRICO.....	6
5.1 Precipitación	6
5.2 Temperatura	6
5.3 Balance hídrico.....	7
5.3.1 Balance hídrico edáfico	7
5.3.2 Balance hídrico global	8
5.3.3 Balance hídrico subterráneo.....	8
5.4 Clasificación climática	9
6. RED HÍDRICA SUPERFICIAL	10
7. SUELOS Y USOS DEL SUELO	11
8. ANTECEDENTES GEOLÓGICOS	13
8.1 Paleoproterozoico.....	15
8.1.1 Granito Arroyo Minuano.....	15
8.1.2 Granito Arroyo Tarariras	15
8.1.3 Granito Piedra Los Indios	16
8.2 Cenozoico.....	16
8.2.1 Formación Camacho	16
8.2.2 Formación Raigón	18
8.2.3 Formación Libertad.....	18
9. ANTECEDENTES HIDROGEOLÓGICOS	20
9.1 Acuífero fracturado.....	21
9.2 Acuífero sedimentario.....	23
10. RESULTADOS	24
10.1 Geología del área de estudio	24
10.1.1 Granitos paleoproterozoicos.....	24
10.1.2 Formación Camacho	24

10.1.3 Formación Raigón	24
10.2 Hidrogeología	27
10.2.1 Acuífero fracturado – Granitos paleoproterozoicos	28
10.2.2 Acuífero sedimentario – Formación Raigón	31
10.2.3 Piezometría	35
10.3 Hidrogeoquímica	38
10.3.1 Conceptos teóricos	38
10.3.1.1 Características fisicoquímicas	38
10.3.1.2 Iones mayoritarios, minoritarios y elementos traza	39
10.3.1.3 Representación gráfica	40
10.3.2 Acuífero fracturado	42
10.3.2.1 Características fisicoquímicas	42
10.3.2.2 Iones mayoritarios y elemento traza (arsénico total)	47
10.3.3 Acuífero sedimentario	57
10.3.3.1 Características fisicoquímicas	57
10.3.3.2 Iones mayoritarios y elemento traza (arsénico total)	62
10.4 Vulnerabilidad	72
10.4.1 Método GOD	72
10.4.1.1 Aplicación del método GOD para el acuífero fracturado	74
10.4.1.2 Aplicación del método GOD para el acuífero sedimentario	75
10.4.1.3 Mapa de vulnerabilidad GOD	76
10.4.2 Método DRASTIC	77
10.4.2.1 Aplicación del método DRASTIC para el acuífero fracturado	80
10.4.2.2 Aplicación del método DRASTIC para el acuífero sedimentario	82
10.4.2.3 Mapa de vulnerabilidad DRASTIC general	84
10.4.2.4 Mapa de vulnerabilidad DRASTIC pesticida	85
10.5 Riesgo a la contaminación	86
11. CONCLUSIÓN	91
12. BIBLIOGRAFÍA	95
13. ANEXOS	101
Anexo I. Tablas del cálculo del balance hídrico	101
Anexo II. Censo de pozos	104
Anexo III. Resultados de parámetros fisicoquímicos	105
Anexo IV. Resultados de análisis químico	106
Anexo V. Censo de pozos (individual)	110
Anexo VI. Comentarios	146

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio.	5
Figura 2. Mapa de cuencas hidrográficas principales.	10
Figura 3. Mapa de suelos del área de estudio. Modificado de la Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay a Escala 1:1.000.000 (Altamirano et al., 1976).	12
Figura 4. Distribución de Terrenos tectonoestratigráficos de Uruguay (Bossi & Gaucher, 2014).	13
Figura 5. Sección de la Carta Geológica del Uruguay a escala 1:500.000 (área de estudio marcado en rojo). Modificado de Bossi & Ferrando (2001).	14
Figura 6. Mapa de Provincias Hidrogeológicas del Uruguay. Modificado de Montañó et al. (2006). ...	20
Figura 7. Sección del Mapa Hidrogeológico del Uruguay (área de estudio marcado en rojo). Modificado de Heinzen et al. (2003).	21
Figura 8. A: Vista general de afloramiento. B y C: Detalle de afloramiento. D y E: Muestra de mano de granito. F: Vista general de afloramiento.	25
Figura 9. A y B: Vista general de barrancas en Balneario Brisas del Plata. C: Detalle de limolitas con concreciones calcáreas (Formación Camacho). D: Muestra de mano de limolita. E: Muestra de mano de arenisca (Formación Raigón).	26
Figura 10. Mapa de pozos del área de estudio.	27
Figura 11. Frecuencia de profundidad total de pozos (m). Acuífero fracturado (n = 8).	28
Figura 12. Frecuencia de caudal (m ³ /h). Acuífero fracturado (n = 9).	29
Figura 13. Caudal vs Profundidad total de pozos. Acuífero fracturado.	30
Figura 14. Frecuencia de nivel estático (m). Acuífero fracturado (n = 7).	30
Figura 15. Pozo brocal (izquierda), pozo semisurgente (derecha).	31
Figura 16. Frecuencia de profundidad total de pozos (m). Pozos semisurgentes.	33
Figura 17. Frecuencia de caudal (m ³ /h). Pozos semisurgentes. Acuífero sedimentario (n = 6).	33
Figura 18. Caudal vs Profundidad total de pozos. Acuífero sedimentario.	34
Figura 19. Frecuencia de nivel estático (m). Acuífero sedimentario (n = 6).	34
Figura 20. Mapa piezométrico del acuífero fracturado. San Pedro, Colonia. Mayo 2021.	36
Figura 21. Mapa piezométrico del acuífero sedimentario. San Pedro, Colonia. Mayo 2021.	37
Figura 22. Mapa de conductividad eléctrica (μS/cm) en agua subterránea (San Pedro, Colonia) correspondiente al acuífero fracturado.	43
Figura 23. Mapa de pH en agua subterránea (San Pedro, Colonia) correspondiente al acuífero fracturado.	44
Figura 24. Mapa de sólidos totales disueltos (ppm) en agua subterránea (San Pedro, Colonia) correspondiente al acuífero fracturado.	46
Figura 25. Mapa de concentración de nitratos [mg/L] en agua subterránea (San Pedro, Colonia) correspondiente al acuífero fracturado.	48
Figura 26. Mapa de concentración de arsénico total [mg/L] en agua subterránea (San Pedro, Colonia) según Norma UNIT 833:2008 correspondiente al acuífero fracturado.	50
Figura 27. Mapa de concentración de arsénico total [mg/L] en agua subterránea (San Pedro, Colonia) según Norma OMS (2021) correspondiente al acuífero fracturado.	51
Figura 28. Diagrama de Piper correspondiente al acuífero fracturado.	53
Figura 29. Mapa hidroquímico según Stiff (San Pedro, Colonia) correspondiente al acuífero fracturado.	54
Figura 30. Diagrama de Schöeller – Berkaloff correspondiente al acuífero fracturado.	55
Figura 31. Diagrama de clasificación de agua destinada al riego (RAS) correspondiente al acuífero fracturado.	56
Figura 32. Mapa de conductividad eléctrica (μS/cm) en agua subterránea (San Pedro, Colonia) correspondiente al acuífero sedimentario.	58
Figura 33. Mapa de pH en agua subterránea (San Pedro, Colonia) correspondiente al acuífero sedimentario.	59
Figura 34. Mapa de sólidos totales disueltos (ppm) en agua subterránea (San Pedro, Colonia) correspondiente al acuífero sedimentario.	61
Figura 35. Mapa de concentración de nitratos [mg/L] en agua subterránea (San Pedro, Colonia) correspondiente al acuífero sedimentario.	63
Figura 36. Mapa de concentración de arsénico total [mg/L] en agua subterránea (San Pedro, Colonia) según Norma UNIT 833:2008 correspondiente al acuífero sedimentario.	65
Figura 37. Mapa de concentración de arsénico total [mg/L] en agua subterránea (San Pedro, Colonia) según Norma OMS (2021) correspondiente al acuífero sedimentario.	66
Figura 38. Diagrama de Piper correspondiente al acuífero sedimentario.	68

Figura 39. Mapa hidroquímico según Stiff (San Pedro, Colonia) correspondiente al acuífero sedimentario.....	69
Figura 40. Diagramas de Schöeller – Berkloff correspondientes al acuífero sedimentario.....	70
Figura 41. Diagrama de clasificación de agua destinada al riesgo (RAS) correspondiente al acuífero sedimentario.....	71
Figura 42. Método GOD para caracterizar la vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero. Modificado de Foster (1987).	73
Figura 43. Mapa de vulnerabilidad mediante la aplicación del método GOD.....	76
Figura 44. Mapa de vulnerabilidad mediante la aplicación del método DRASTIC general.....	84
Figura 45. Mapa de vulnerabilidad mediante la aplicación del método DRASTIC pesticida.....	85
Figura 46. Mapa de ubicación de fuentes puntuales y dispersas (San Pedro, Colonia).	88
Figura 47. Mapa de riesgo según método DRASTIC pesticida (San Pedro, Colonia).	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Precipitación acumulada (mm) mensual en el periodo 2011 – 2021.	6
Tabla 2. Temperatura media mensual en el periodo 2011 – 2021.....	7
Tabla 3. Resultado del balance hídrico global.....	8
Tabla 4. Clasificación climática (%) según Thornthwaite (1948).....	9
Tabla 5. Resultados de variables climáticas del área de estudio.....	9
Tabla 6. Valores de calidad de agua potable según Norma UNIT 833:2008 y OMS (2021).	40
Tabla 7. Clases de agua correspondiente al Diagrama RAS.....	42
Tabla 8. Definiciones de vulnerabilidad.....	72
Tabla 9. Cálculo de la vulnerabilidad del acuífero fracturado mediante la aplicación del método GOD.	74
Tabla 10. Cálculo de la vulnerabilidad del acuífero sedimentario mediante la aplicación del método GOD.....	75
Tabla 11. Valoración de parámetros para el método DRASTIC (Vargas & Tosse, 2010).	77
Tabla 12. Factores de ponderación (Vargas & Tosse, 2010).....	79
Tabla 13. Evaluación de la vulnerabilidad según el método DRASTIC (Vargas & Tosse, 2010).	79
Tabla 14. Cálculo de la vulnerabilidad del acuífero fracturado mediante la aplicación del método DRASTIC.....	81
Tabla 15. Cálculo de la vulnerabilidad del acuífero sedimentario mediante la aplicación del método DRASTIC.....	83
Tabla 16. Definición cualitativa del riesgo a la contaminación del agua subterránea a partir de índices de vulnerabilidad y carga potencial contaminante según Foster & Hirata (1988).	87
Tabla 17. Riesgo a la contaminación de las aguas subterráneas.....	90
Tabla A 1. Balance hídrico edáfico del área de estudio.....	101
Tabla A 2. Balance hídrico edáfico del área de estudio.....	102
Tabla A 3. Balance hídrico edáfico del área de estudio.....	103
Tabla A 4. Censo de pozos. Acuífero fracturado.	104
Tabla A 5. Censo de pozos. Acuífero sedimentario.....	104
Tabla A 6. Resultados de parámetros fisicoquímicos. Acuífero fracturado.	105
Tabla A 7. Resultados de parámetros fisicoquímicos. Acuífero sedimentario.....	105
Tabla A 8. Resultados de análisis químico. Acuífero fracturado.....	106
Tabla A 9. Resultados de análisis químico. Acuífero sedimentario.	107
Tabla A 10. Resultados de análisis químico. Acuífero sedimentario (continuación).	108
Tabla A 11. Resultados de análisis químico. Acuífero sedimentario (continuación).	109

RESUMEN

La localidad de San Pedro se localiza al Suroeste del Departamento de Colonia, a unos 18 km de la ciudad de Colonia del Sacramento. La actividad principal es la producción lechera y la agricultura, actividades que requieren grandes volúmenes de agua, que obtienen del acuífero fracturado, constituido por granitos Paleoproterozoicos y del acuífero sedimentario, compuesto por sedimentos de la Formación Raigón. Debido al uso intensivo del agua subterránea y la necesidad de disponer de agua de calidad, se caracterizó hidrogeoquímicamente el agua subterránea de estos dos acuíferos principales.

El área de estudio abarca 150 km² aproximadamente, está constituida por cuerpos graníticos de edad Paleoproterozoica, representados por el Granito Arroyo Minuano, Granito Arroyo Tarariras y Granito Piedra Los Indios y por las formaciones Camacho, Raigón y Libertad, de edad Cenozoica.

Para cumplir con el objetivo del trabajo, se revisaron y analizaron antecedentes geológicos e hidrogeológicos y se realizaron tareas de campo de reconocimiento de unidades geológicas, de inventario de puntos de agua, mediciones de parámetros fisicoquímicos, muestreo de agua subterránea y evaluación de la vulnerabilidad. Para el análisis de iones mayoritarios, las muestras fueron enviadas al Laboratorio de Agua y Suelos del Centro Universitario Regional Litoral Norte (CENUR-LN), según APHA, AWWA & WPCF (2017). Los análisis de Arsénico (As) fueron efectuados por el Centro Especializado en Química Toxicológica (CEQUIMTOX) de Facultad de Química. La determinación de As se realizó mediante espectrometría de emisión atómica con plasma inducido por microondas acoplado a la generación de hidruros (HG-MIP OES) con la metodología desarrollada y validada en el laboratorio. Se utilizó cartuchos aniónicos SAX – SPE para la determinación de las especies de As (As³⁺ y As⁵⁺).

De los resultados de los análisis químicos, se obtuvo que el agua subterránea del acuífero fracturado se clasifica como bicarbonatada sódica-cálcica, presentando alta salinidad y bajo contenido en sodio. Respecto al agua subterránea del acuífero sedimentario, se clasifica como bicarbonatada sódica-cálcica, teniendo la mayoría de las muestras alta a media salinidad y bajo contenido en sodio. Considerando ambos acuíferos, las concentraciones elevadas de As se determinaron en los sectores Norte-noreste y Sur del área de estudio. Se observa en ambos acuíferos contaminación orgánica por nitratos, coliformes totales y coliformes fecales, debido al mal manejo del agua y suelo en las actividades relacionadas al tambo principalmente.

La evaluación de la vulnerabilidad de los acuíferos fracturado y sedimentario se realizó mediante la aplicación de los métodos GOD (Foster, 1987) y DRASTIC (Aller et al., 1987), como resultado se obtuvieron mapas de vulnerabilidad permitiendo la identificación de las zonas más susceptibles a la contaminación. El mapa de vulnerabilidad GOD presenta zonas de vulnerabilidad moderada, baja a moderada y despreciable a baja. El mapa de vulnerabilidad DRASTIC general muestra zonas de vulnerabilidad moderada y baja, mientras que el mapa de vulnerabilidad DRASTIC pesticida presenta zonas de vulnerabilidad alta y moderada.

1. INTRODUCCIÓN

El agua subterránea es un recurso de vital importancia para las actividades agrícolas, en especial la producción lechera. Su importancia radica en tres aspectos fundamentales: el agua como factor en la salud y nutrición del animal, el agua como elemento para la higiene de las instalaciones del tambo y el agua como factor en la salud de la población rural involucrada (Herrero et al., 2002).

La producción lechera en tambos es una de las actividades que más contamina el agua subterránea, cuando no está dimensionado el sistema de manejo y tratamiento de efluentes, siendo el nitrato uno de los contaminantes principales. Las fuentes principales de contaminación son los efluentes del tambo, formado por heces, orina, barro, restos de leche y aguas pluviales, que se suman al agua de lavado. Se estima que en Uruguay se generan 4 litros de efluentes por cada litro de leche producida, y en los últimos años, la lechería presenta un crecimiento anual promedio de 5%. Generalmente, los tambos del país no separan manualmente los sólidos antes del lavado de las instalaciones de ordeño (Vasallo, 2008).

El Departamento de Colonia ha sido una región tradicionalmente lechera y actualmente sigue siendo uno de los principales productores lecheros. Además de las regiones lecheras, el Oeste de Colonia tiene una agricultura extensiva de secano (básicamente cerealera y de oleaginosas) asociada a suelos más aptos, y de manera dispersa y de bajo porcentaje aparece en toda la costa Sur una agricultura intensiva (fruticultura de hoja caduca, cítricos, viñedos y huerta) (DIEA, 2015).

El área de estudio se ubica al Suroeste del Departamento de Colonia, a unos 18 km de la ciudad de Colonia del Sacramento, con una extensión aproximada de 150 km², sobre granitos de edad Paleoproterozoica que son cubiertos en gran parte por las formaciones Camacho, Raigón y Libertad, de edad Cenozoica. En la zona se pudo censar y muestrear un total de 36 pozos, de los cuales 25 corresponden al acuífero sedimentario, conformado por la Formación Raigón y 11 al acuífero fracturado, constituido por los granitos Paleoproterozoicos.

El agua subterránea constituye uno de los recursos naturales más importantes del área de estudio, empleándose para consumo humano, animal, riego y para la limpieza en tambos. Por este motivo, es esencial reconocer los acuíferos explotados, determinar su uso y sus características químicas, para poder gestionarlo de manera sustentable. El trabajo busca evaluar la calidad del agua subterránea y determinar las fuentes de contaminación más comunes vinculadas al manejo del agua subterránea.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Caracterizar químicamente y evaluar la calidad del agua subterránea de los acuíferos presentes en la Cuenca del Arroyo San Pedro y Cuenca del Arroyo de la Caballada, en la localidad de San Pedro, Departamento de Colonia.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar y delimitar los acuíferos existentes en la Cuenca del Arroyo San Pedro y Cuenca del Arroyo de la Caballada.
- Realizar el balance hídrico y evaluar la infiltración.
- Determinar la química del agua subterránea y clasificarla para los diversos usos.
- Analizar la evolución química del agua subterránea junto a la piezometría de los acuíferos existentes.
- Evaluar la vulnerabilidad y determinar el riesgo a la contaminación de los acuíferos.

3. METODOLOGÍA

3.1 Etapa de gabinete I

- Revisión, recopilación y análisis de antecedentes geológicos e hidrogeológicos del área de estudio.
- Utilización y tratamiento de imágenes satelitales, fotografías aéreas y cartas topográficas a escala 1:50.000 del Servicio Geográfico Militar (SGM) del año 1990.
- Elaboración de planillas para inventario de pozos.
- Manejo e ingreso de datos en QG/S versión 3.16.

3.2 Trabajo de campo

- Reconocimiento de unidades geológicas.
- Inventario de pozos: geolocalización de pozos, medición de profundidad total y profundidad de nivel de agua, medición de parámetros fisicoquímicos, evaluación de características constructivas, distancias a fuentes de contaminación y uso del agua subterránea. Para la medición de profundidad total de pozo y profundidad de nivel de agua se utilizó sonda marca Solinst modelo 101. Para la medición de parámetros fisicoquímicos (conductividad eléctrica, pH, Eh, oxígeno disuelto, sólidos totales disueltos, turbidez y temperatura) se utilizó sonda multiparámetro marca Hanna Instruments modelo HI 9829.
- Toma de muestras de agua subterránea para análisis químico de iones mayoritarios en botellas de polietileno tereftalato (PET) de 300 mL.
- Toma de muestras de agua subterránea para análisis de Arsénico (As) y alcalinidad efectuadas en tubos Falcon estériles de 50 mL.

- Toma de muestras de agua subterránea para análisis bacteriológico efectuadas en botellas plásticas estériles de 500 mL.

3.3 Tareas de laboratorio

- Los análisis químicos de iones mayoritarios fueron realizados por el Laboratorio de Agua y Suelos del Centro Universitario Regional Litoral Norte (CENUR-LN) según APHA, AWWA & WPCF (2017).
- Los análisis de As fueron efectuados por el Centro Especializado en Química Toxicológica (CEQUIMTOX) de Facultad de Química. La determinación de As se realizó mediante espectrometría de emisión atómica con plasma inducido por microondas acoplado a la generación de hidruros (HG-MIP OES) con la metodología desarrollada y validada en el laboratorio. Se utilizó cartuchos aniónicos SAX – SPE para la determinación de las especies de As (As^{3+} y As^{5+}).
- La determinación de alcalinidad se realizó en campo según la metodología descrita en el Manual de Procedimientos Analíticos para Muestras Ambientales (Menéndez, 2017).
- Los análisis bacteriológicos fueron realizados por la Cooperativa Laboratorio Veterinario de Colonia (COLAVECO), se determinaron Coliformes Totales (APHA 9222B), Coliformes Fecales (APHA 9222D), *Pseudomonas aeruginosa* (UNIT 943:1994) y Heterotróficos 35 °C (FM/APHA 9215D).

3.4 Etapa de gabinete II

- Procesamiento, análisis e interpretación de los datos obtenidos en el trabajo de campo y laboratorio. El reconocimiento del tipo de acuífero (fracturado o sedimentario) se realizó en función de la profundidad total de pozo.
- Cálculo del balance hídrico mediante el método de Thornthwaite (1948) y Thornthwaite y Mather (1957).
- Elaboración de mapas piezométricos del acuífero fracturado y sedimentario a escala 1:70.000, mediante software *QGIS* versión 3.16 y corrección manual posterior.
- Elaboración de mapas de isovalores (conductividad eléctrica, pH, sólidos totales disueltos, As, NO_3^-) del acuífero fracturado y sedimentario a escala 1:70.000, mediante software *QGIS* versión 3.16.
- Representación gráfica de datos hidrogeoquímicos a través de diagramas Piper, Stiff, Schöeller – Berkloff y RAS, mediante software de acceso libre *Diagrammes* y *Easy Quim*, realizando los cálculos de error correspondientes.
- Aplicación de métodos GOD (Foster, 1987) y DRASTIC (Aller et al., 1987) para determinar la vulnerabilidad del acuífero fracturado y sedimentario.
- Determinación del riesgo a la contaminación.

4. ÁREA DE ESTUDIO

4.1 Ubicación y vías de acceso

El área de estudio se ubica en el sector Suroeste del Departamento de Colonia, abarcando las Cuencas del Arroyo San Pedro y Arroyo de la Caballada, con una extensión aproximada de 150 km². Se sitúa a 18 km de la ciudad de Colonia del Sacramento y a 195 km de la ciudad de Montevideo. La vía de acceso principal desde la ciudad de Montevideo se realiza por Ruta Nacional N° 1 “Brigadier General Manuel Oribe” y Ruta Nacional N° 21. El área de estudio se encuentra entre las coordenadas X: 6.192.000, X': 6.210.000; Y: 306.000, Y': 320.000, según las cartas topográficas La Estanzuela (O-26) y Colonia del Sacramento (O-27) del Plan Cartográfico Nacional a Escala 1:50.000 del Servicio Geográfico Militar (Fig. 1).

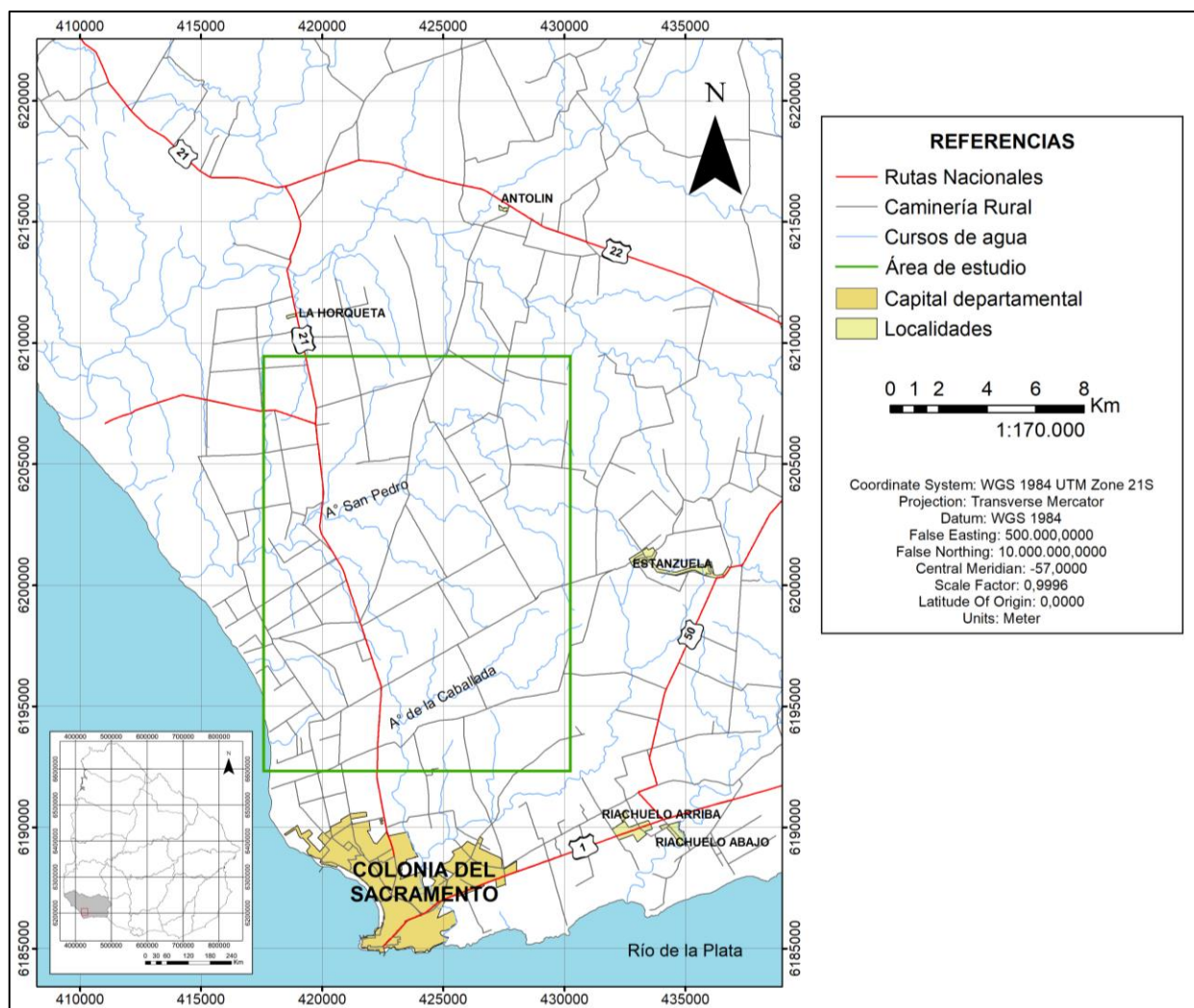


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio.

5. CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS Y BALANCE HÍDRICO

Las características climáticas del área de estudio se determinaron a partir de los datos de precipitación y temperatura media anual de la Estación La Estanzuela, para el período 2011 – 2021, del Banco de Datos Agroclimáticos del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA).

5.1 Precipitación

La precipitación es uno de los componentes fundamentales del ciclo hidrológico y variable de entrada de todo sistema hidrológico. Para caracterizar el área de estudio y posterior cálculo del balance hídrico, se analizaron los datos de precipitación para el período 2011 – 2021, obteniéndose una precipitación media anual de 1134,3 mm. El año 2014 fue el más lluvioso, con una precipitación media anual de 1930,8 mm, siendo octubre el mes más lluvioso con 382,5 mm y el año 2011 fue el más seco, con una precipitación media anual de 697,2 mm, siendo setiembre el mes más seco con 2,4 mm (Tabla 1).

Tabla 1. Precipitación acumulada (mm) mensual en el periodo 2011 – 2021.
Banco de Datos Agroclimáticos del INIA, Estación La Estanzuela.

Mes/Año	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Enero	76,4	38,0	47,7	195,6	150,0	42,1	122,2	153,4	146,8	76,5	174,7
Febrero	81,3	180,0	88,6	301,2	25,1	144,8	77,3	76,1	121,3	69,6	115,2
Marzo	37,2	132,6	62,6	142,0	26,1	96,9	134,5	167,8	93,2	62,8	109,3
Abril	81,4	53,0	64,6	76,1	47,8	340,5	43,2	133,6	20,8	121,7	88,7
Mayo	56,7	65,4	88,0	93,8	16,4	31,8	118,2	138,4	95,2	8,7	114,8
Junio	92,3	20,1	2,8	45,0	40,8	21,8	9,5	11,5	134,6	106,1	50,2
Julio	68,8	25,8	40,2	157,4	38,5	156,9	95,1	113,5	61,7	30,1	64,0
Agosto	13,8	153,5	42,9	11,3	241,5	94,3	134,8	82,4	40,6	38,2	58,1
Setiembre	2,4	165,9	211,6	206,2	31,8	75,1	167,5	93,8	65,2	63,9	152,6
Octubre	60,7	219,4	31,7	382,5	84,0	123,8	121,7	30,5	190,3	91,7	23,1
Noviembre	66,0	76,8	98,9	221,0	113,4	104,0	61,2	79,4	42,6	31,1	145,1
Diciembre	60,2	256,9	10,6	98,7	83,9	111,8	127,8	153,6	81,5	62,7	28,5
Total anual	697,2	1387,4	790,2	1930,8	899,3	1343,8	1213,0	1234,0	1093,8	763,1	1124,3

5.2 Temperatura

La temperatura es otro de los componentes fundamentales para la caracterización climática y cálculo de evapotranspiración. A partir del análisis de los datos de temperatura para el período 2011 – 2021, se obtuvo una temperatura media anual de 16,9 °C. El mes más caluroso fue diciembre del año 2013, con una temperatura media mensual de 25,0 °C y el mes más frío fue julio del año 2012, con una temperatura media mensual de 7,8 °C (Tabla 2).

Tabla 2. Temperatura media mensual en el periodo 2011 – 2021.
Banco de Datos Agroclimáticos del INIA, Estación la Estanzuela.

Mes/Año	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Enero	24,0	23,6	23,1	24,0	22,5	23,4	24,0	23,5	23,1	22,9	23,1
Febrero	22,5	23,1	22,1	21,4	22,7	24,4	23,6	22,7	21,9	22,5	21,5
Marzo	20,8	20,0	18,2	19,0	21,1	19,5	20,5	20,1	19,5	22,3	20,3
Abril	17,6	16,2	17,4	16,8	19,0	16,7	17,4	20,5	17,5	16,8	18,7
Mayo	13,1	15,6	13,5	13,4	15,6	11,3	14,8	15,3	14,5	14,0	12,5
Junio	10,5	10,6	10,9	10,6	12,4	9,3	12,8	9,8	13,5	11,4	10,7
Julio	9,5	7,8	10,3	11,2	11,1	10,0	12,4	9,5	9,9	9,2	10,7
Agosto	10,3	12,7	10,2	13,3	14,3	12,5	13,6	10,8	10,5	12,4	11,3
Setiembre	14,0	13,8	13,1	14,6	12,4	12,7	14,6	15,5	12,5	12,5	13,9
Octubre	15,5	16,7	16,0	18,7	14,3	16,2	16,3	15,3	15,8	15,4	16,5
Noviembre	20,7	20,8	19,4	19,3	18,4	19,1	18,3	19,6	20,8	19,4	19,6
Diciembre	20,6	22,7	25,0	21,6	22,4	23,0	22,3	20,5	21,9	21,6	22,3
Promedio anual	16,59	16,97	16,6	16,99	17,18	16,51	17,55	16,92	16,78	16,7	16,76

5.3 Balance hídrico

El balance hídrico es fundamental para entender los volúmenes de agua que ingresan y que forman parte de las reservas del sistema. Los factores que influyen la recarga de acuíferos son la precipitación, infiltración, evapotranspiración, escorrentía y temperatura. Siendo la precipitación el componente de entrada principal de la ecuación del balance hídrico.

La determinación del balance hídrico fue realizada mediante el método de Thornthwaite y Mather (1957), con base en la capacidad de campo del suelo, precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial es posible determinar el almacenamiento y su variación, la evapotranspiración real, el exceso y el déficit, mediante tablas y fórmulas.

5.3.1 Balance hídrico edáfico

Para aplicar la metodología de Thornthwaite y Mather (1957) fue necesario estimar la capacidad de campo del suelo, siendo para el área de estudio un valor de 130 mm, de acuerdo al tipo de suelo y cobertura vegetal existente. Los valores de precipitación y temperatura se obtuvieron a partir de la Estación La Estanzuela para el período 2011 – 2021. La evapotranspiración potencial se calculó por el método de Thornthwaite (1948) según la siguiente ecuación:

$$ETP = 16 c \left(\frac{10 t}{I} \right)^a \quad \text{Thornthwaite (1948)}$$

ETP = evapotranspiración potencial en mm/mes

*c = constante que vale $c = \frac{n}{12} * \frac{d^2}{30}$*

n = número máximo de horas de sol según la latitud

d = número de días del mes

I = índice de calor anual que vale Σi

$$i = \text{índice de calor mensual } i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1,514}$$

$t = \text{temperatura media diaria del mes } (^{\circ}\text{C})$

$$a = 675 * 10^{-9} * I^3 - 771 * 10^{-7} * I^2 - 1972 * 10^{-5} * I + 0,49239$$

Los valores de evapotranspiración real (ETR) se obtuvieron a partir del almacenamiento y variación en el suelo, para posteriormente obtener el exceso (E) y el déficit (D). Aplicando la metodología detallada anteriormente, se obtiene para la evapotranspiración potencial un valor de 781,4 mm/año y para la evapotranspiración real un valor de 750,4 mm/año. El exceso calculado es de 384,2 mm/año, cuyo valor representa un 34% de la precipitación media anual registrada de 1134,3 mm. Los meses de setiembre y octubre presentan mayor exceso hídrico. El déficit registrado muestra un valor de 31,0 mm/año, en general ocurre un mayor déficit hídrico durante los meses de enero, marzo y diciembre.

5.3.2 Balance hídrico global

Se presentan a continuación los valores medios (mm/año) de las variables que integran el ciclo hidrológico en el periodo 2011 – 2021 para la Estación La Estanzuela (Tabla 3). Las ecuaciones utilizadas fueron:

$$P = ETR + ES + I \qquad P - ETR = ES + I = E$$

P = precipitación; ETR = evapotranspiración real; ES = escorrentía;
I = Infiltración, E = Exceso

Tabla 3. Resultado del balance hídrico global.

	%	mm/año
P	100	1134,3
ETR	66	750,4
E	34	384,2

5.3.3 Balance hídrico subterráneo

La finalidad de realizar este balance es estimar la recarga anual en el área de estudio. Debido a la ausencia de estaciones de aforo en el área de estudio para la medición de caudales en arroyos y cañadas, según lo propuesto por Thornthwaite, el 50% del exceso se descarga a ríos y el resto se infiltra. El exceso registra un valor de 384,2 mm/año, por lo tanto, se estima un valor de escorrentía e infiltración de 192,1 mm/año, verificando la siguiente ecuación:

$$P (100\%) = ETR (66\%) + ES (17\%) + I (17\%)$$

5.4 Clasificación climática

La clasificación climática según la metodología de Thornthwaite (1948) se basa en la evapotranspiración potencial como parámetro fundamental, la cual se expresa en función de la temperatura media mensual y el índice de calor anual. Se incluye la precipitación para determinar el balance hídrico, y obtener el exceso (E) y déficit (D) y así realizar el cálculo del índice de aridez (Ia), índice de humedad (Ih) e índice hídrico (Im).

$$Ia = \frac{100 * D}{ETP} \quad Ih = \frac{100 * E}{ETP} \quad Im = Ih - 0,6 * Ia \quad \text{Thornthwaite (1948)}$$

A partir del índice hídrico se realiza la clasificación climática propuesta por Thornthwaite (1948) donde se diferencian nueve tipos de climas (Tabla 4).

Tabla 4. Clasificación climática (%) según Thornthwaite (1948).

Tipo de clima		Índice de humedad
A	Perhúmedo	> 100
B ₄	Húmedo	80 a 100
B ₃	Húmedo	60 a 80
B ₂	Húmedo	40 a 60
B ₁	Húmedo	20 a 40
C ₂	Subhúmedo húmedo	0 a 20
C ₁	Subhúmedo seco	-20 a 0
D	Semiárido	-40 a -20
E	Árido	-60 a -40

De acuerdo a la metodología, el tipo de clima correspondiente al área de estudio es húmedo (B₂), con un índice hídrico de 46,79. A continuación se presentan los resultados de las variables climáticas (Tabla 5).

Tabla 5. Resultados de variables climáticas del área de estudio.

Estación La Estanzuela	
D	31,0 mm
E	384,2 mm
ETP	781,4 mm
Ia	3,97
Ih	49,17
Im	46,79

6. RED HÍDRICA SUPERFICIAL

La red hídrica superficial en el área de estudio es densa y determina patrones de tipo dendrítico. Los cursos de agua superficiales principales son el Arroyo San Pedro y el Arroyo de la Caballada, ambos desembocando en el Río de la Plata a 0 msnm. El Arroyo San Pedro fluye en dirección predominante NE-SW, con una inflexión SE-NW en parte de su recorrido y presenta cota de nacimiento de 68 msnm. El Arroyo de la Caballada presenta dirección general N-S y NE-SW, con una pequeña inflexión SE-NW en parte de su recorrido y presenta cota de nacimiento de 59 msnm. A continuación se muestran las dos principales cuencas hidrográficas según la Dirección Nacional de Aguas (DINAGUA) (Fig. 2).

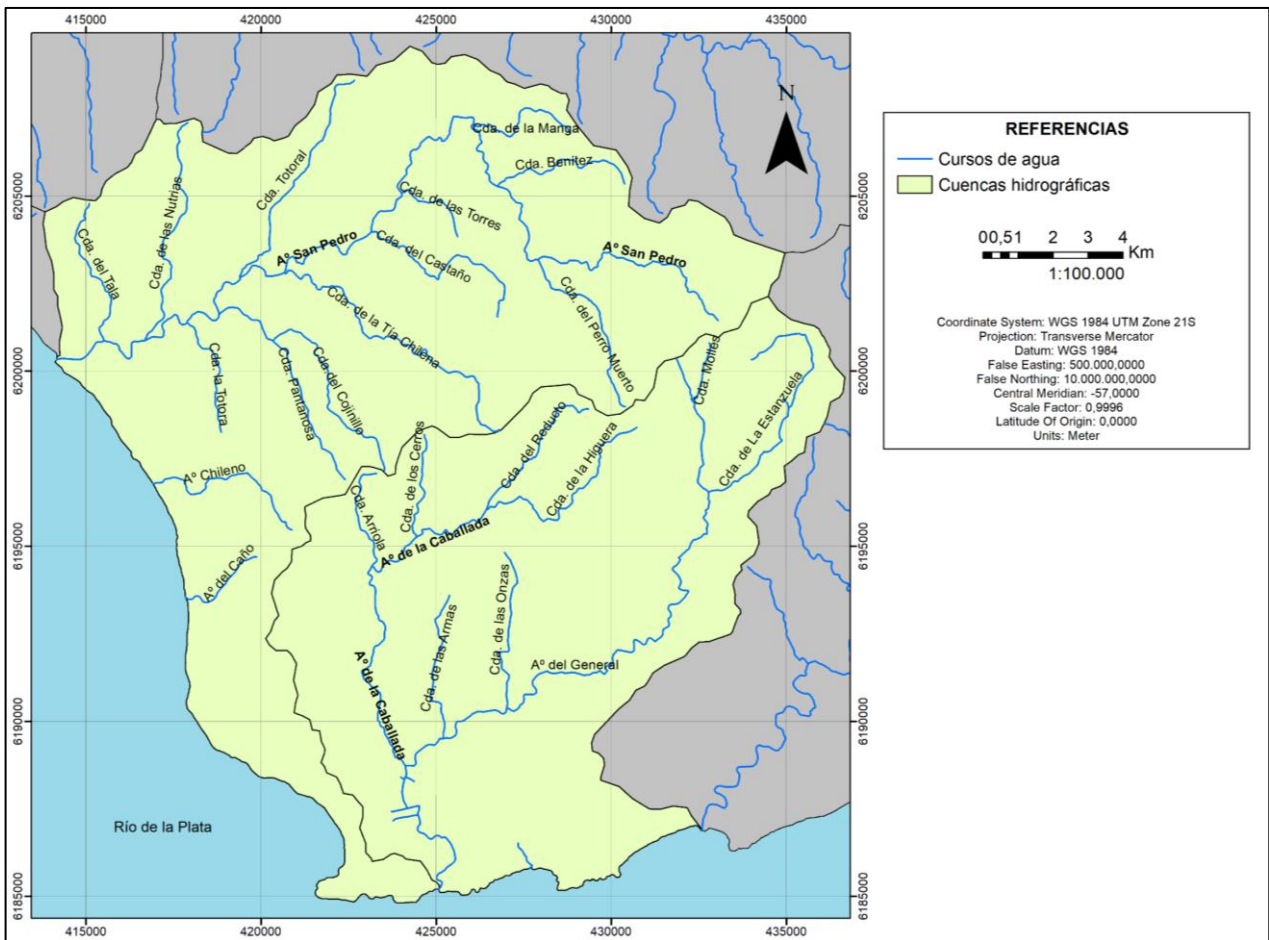


Figura 2. Mapa de cuencas hidrográficas principales.

7. SUELOS Y USOS DEL SUELO

De acuerdo con la Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay a Escala 1:1.000.000 (Altamirano et al., 1976), las unidades de suelo que comprende el área de estudio son: Unidad Ecilda Paullier – Las Brujas (EP – LB) y Unidad Kiyú (Ky), ambas unidades están caracterizadas por poseer suelos dominantes y suelos asociados (Fig. 3).

Unidad Ecilda Paullier – Las Brujas: se caracteriza por tener como suelos dominantes Brunosoles Éútricos (Subéútricos) Típicos (Lúvicos) y como suelos asociados Brunosoles Subéútricos (Éútricos) Típicos/Lúvicos (Altamirano et al., 1976). La unidad tiene como material generador sedimentos limo-arcillosos hasta areno-arcillosos, vinculados a la Formación Libertad y en menor medida a la Formación Fray Bentos. Presenta lomadas fuertes, pendiente de 3%, erosión moderada y tiene nula rocosidad y pedregosidad (MGAP, 2002).

Unidad Kiyú: tiene como suelos dominantes Brunosoles Subéútricos/Éútricos Típicos/Lúvicos y Planosoles Subéútricos/Éútricos Melánicos y como suelos asociados Argisoles Subéútricos Melánicos Abrúpticos (Altamirano et al., 1976). La unidad se genera a partir de sedimentos limo-arcillosos hasta areno-gravillosos asociados a las formaciones Dolores y Raigón. Presenta lomadas suaves y llanuras altas, pendiente de 1%, ligera erosión y posee nula rocosidad y pedregosidad (MGAP, 2002).

El uso del suelo es principalmente agrícola de secano y ganadero vacuno destinado para la producción lechera. Secundariamente se desarrolla plantación forestal y actividades de explotación de granito en canteras de escasa extensión.

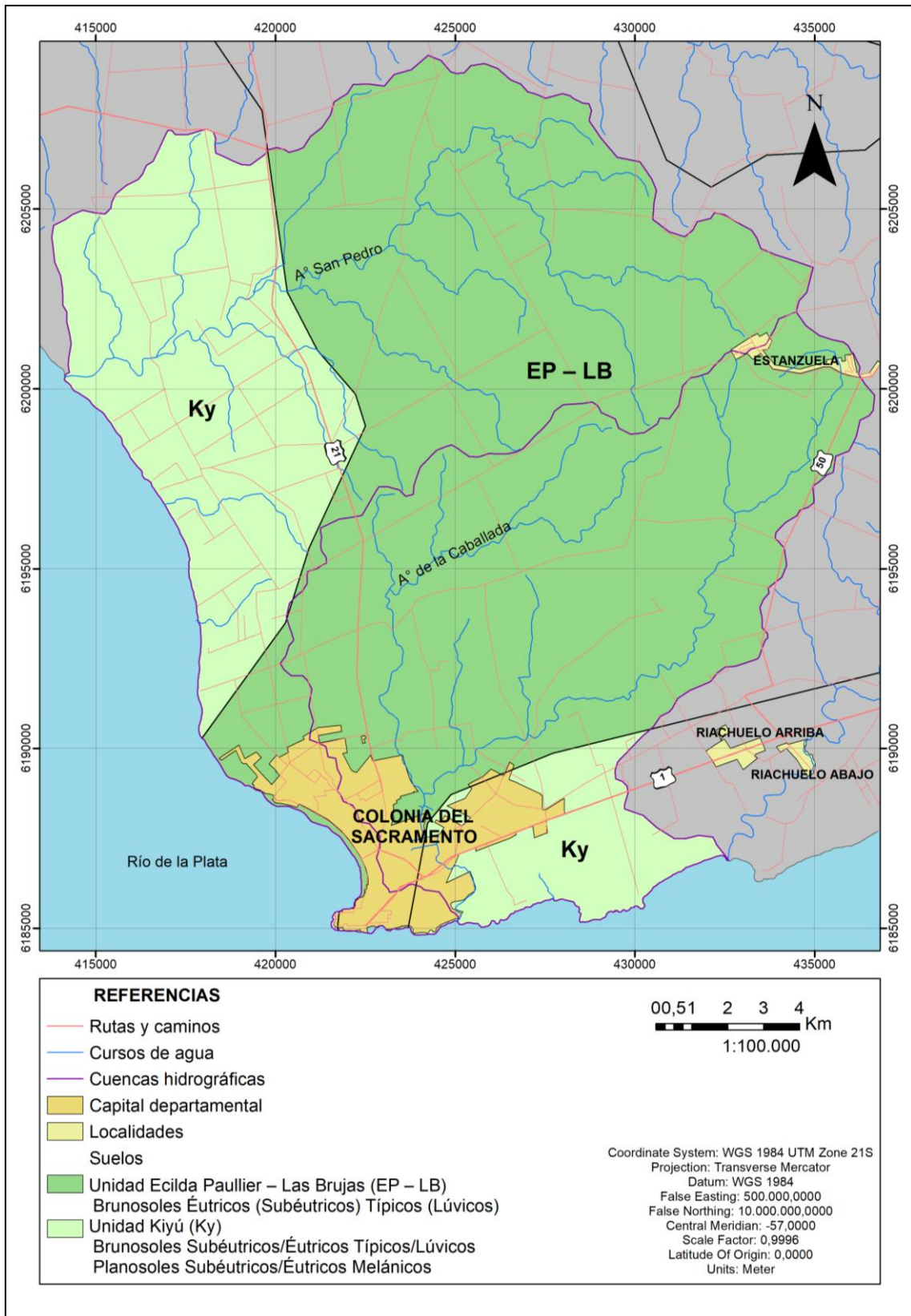


Figura 3. Mapa de suelos del área de estudio. Modificado de la Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay a Escala 1:1.000.000 (Altamirano et al., 1976).

8. ANTECEDENTES GEOLÓGICOS

El área de estudio se ubica en el Terreno tectonoestratigráfico Piedra Alta (TPA), definido por Bossi et al. (1993), limitado al Este por la Zona de Cizalla Sarandí del Yí y al Sur por la faja de milonitas Colonia-Pavón, extendiéndose hacia al Norte y Oeste por debajo de los sedimentos y lavas del Fanerozoico (Fig. 4). El TPA se encuentra integrado por dos cinturones metamórficos de bajo grado con dirección E-W, denominados Cinturón Andresito y Cinturón San José, separados por una extensa faja granito-gnéisica (Bossi & Piñeiro, 2014).

Peel & Preciozzi (2006) en función de datos geocronológicos, presentan valores de TDM y edades de cristalización en el sector Sur del TPA, estableciendo una evolución geológica ocurrida en un intervalo de tiempo de 300 Ma entre 2.4 – 2.3 Ga para la acreción principal de sus protolitos y 2.1 – 2.0 Ga para el magmatismo, metamorfismo y deformación. Además, los autores sugieren que el TPA representa una unidad geotectónica paleoproterozoica juvenil estable desde 1.7 Ga y no afectada internamente por eventos Neoproterozoicos.

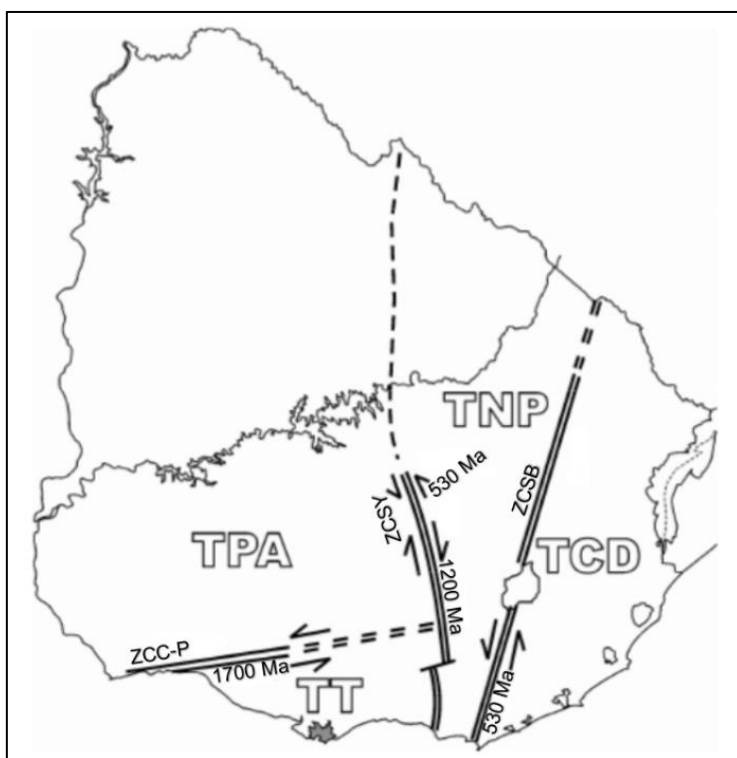


Figura 4. Distribución de Terrenos tectonoestratigráficos de Uruguay (Bossi & Gaucher, 2014).

TPA: Terreno Piedra Alta; TT: Terreno Tandilia; TNP: Terreno Nico Pérez; TCD: Terreno Cuchilla Dionisio;
ZCSY: Zona de Cizalla Sarandí del Yí; ZCSB: Zona de Cizalla Sierra Ballena; ZCC-P: Zona de Cizalla Colonia-Pavón.

Según la Carta Geológica del Uruguay a escala 1:500.000 (Bossi & Ferrando, 2001) el área de estudio se encuentra conformada por fajas granito-gneissicas de edad Paleoproterozoica, y por unidades sedimentarias de edad Cenozoica integradas por las formaciones Raigón y Libertad (Fig. 5). Gianotti & Arrighetti (2017) elaboran un mapa

geológico de las hojas Rosario (83) y Colonia (91) a escala 1:100.000 reconociendo para el área de estudio el Granito Arroyo Minuano, Granito Arroyo Tarariras y Granito Piedra Los Indios. La cartografía realizada en dicho trabajo no considera la Formación Raigón aflorante, cabe destacar que en la zona se han realizado varios cateos y perfiles geológicos de perforaciones de monitoreo, observándose los sedimentos correspondientes a la Formación Raigón, por ello en este trabajo se sigue la propuesta de Bossi & Ferrando (2001).

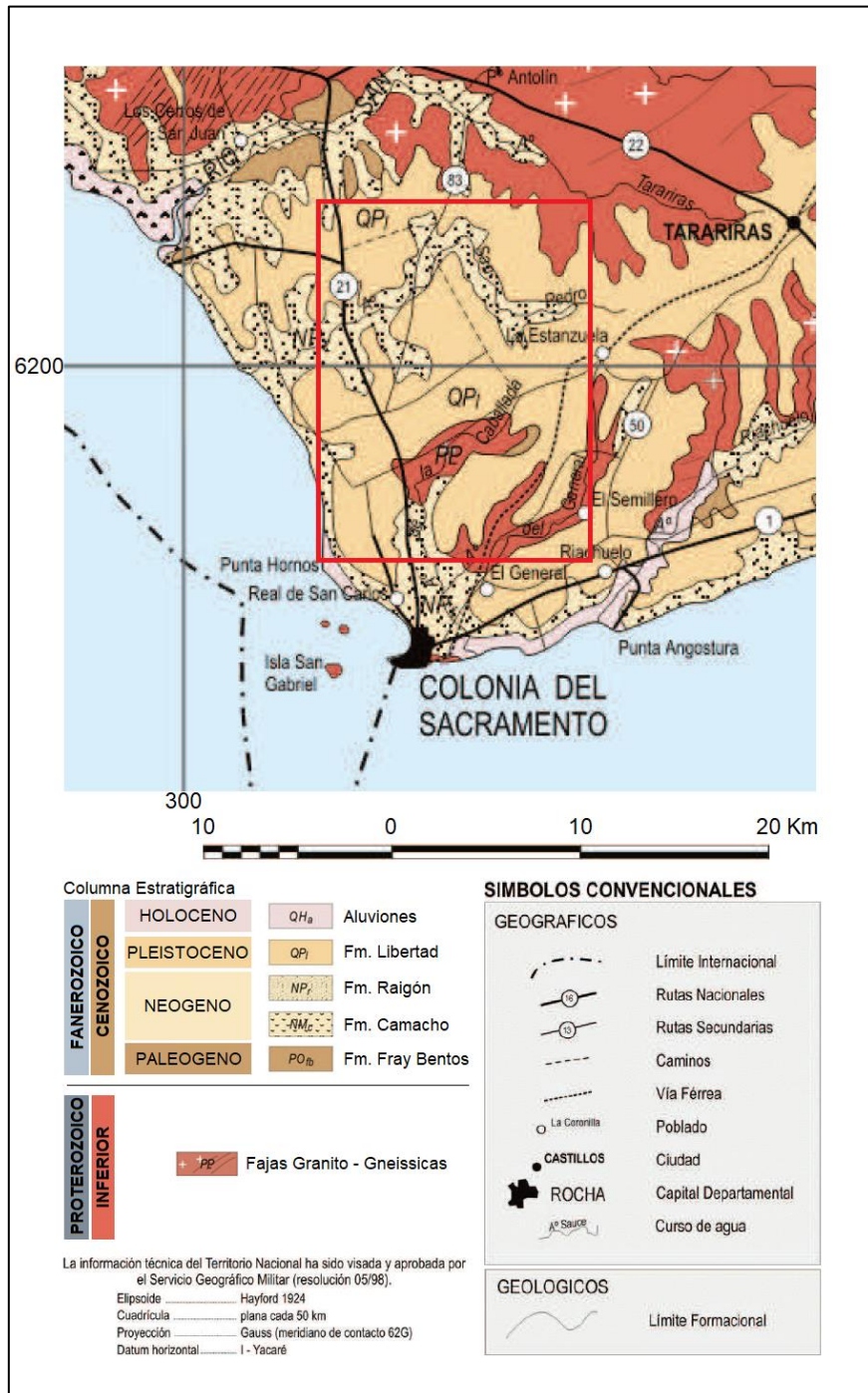


Figura 5. Sección de la Carta Geológica del Uruguay a escala 1:500.000 (área de estudio marcado en rojo). Modificado de Bossi & Ferrando (2001).

8.1 Paleoproterozoico

8.1.1 Granito Arroyo Minuano

El Granito Arroyo Minuano ha sido descrito por Gianotti & Arrighetti (2017) como un granito leucócrata, de grano medio, equigranular a localmente inequigranular e isótropo con ligera deformación dúctil. Compuesto por cuarzo, feldespato rosado y abundante biotita. El granito presenta abundantes recortes pegmatíticos verticalizados con direcciones generales N80E, mineralógicamente compuestos por cristales de feldespato de 7 cm de largo. La roca caja corresponde a una anfibolita biotítica poco foliada, con espesores que varían entre 4 a 5 m, de dirección E-W y buzamiento de bajo ángulo al N. Presenta color verde, grano fino a medio y mineralógicamente compuesta por hornblenda y feldespato. Petrográficamente, la anfibolita biotítica presenta leve orientación preferencial de micas y anfíboles. Se encuentra compuesta por feldespatos, representados por plagioclasa, ortosa y microclina (38 a 43%), hornblenda (23 a 30%), biotita (23 a 25%), cuarzo (7 a 9%) y cristales de epidoto (< 2%) como mineral de alteración. Localmente, se distingue en el granito una foliación de dirección N20E y buzamiento 68° al SE, desarrollando textura milonítica inequigranular interlobada, con bandas de cuarzo-feldespato recrystalizadas, presentando dichos minerales mecanismos de deformación de grado bajo a medio que indican temperaturas de 400 – 500 °C. Además, se presentan micaesquistos de color gris oscuro a verde en contacto con granitos (Gianotti & Arrighetti, 2017).

8.1.2 Granito Arroyo Tarariras

Según Gianotti & Arrighetti (2017) la unidad se manifiesta en bancos elongados, se trata de un granito leucócrata de color blanco grisáceo, de grano fino, equigranular e isótropo. Mineralógicamente, compuesto por abundante biotita (30%) dispersa y en nidos, cuarzo y feldespato. En algunos sectores el granito presenta orientación preferencial de las micas generando tenues foliaciones de dirección N25E, 57° SE a N49, 70°SE. Localmente puede observarse leve deformación en el granito. Petrográficamente, consiste en un granito de grano medio a grueso deformado. Presenta textura equigranular interlobada, compuesto por feldespato (53 a 56%), cuarzo (35 a 38%), biotita (4 a 5%) y sericita-muscovita (8 a 1%). En otras muestras se presenta granate (< 2%) como secundarios. La deformación es evidenciada por la observación de bandas de deformación en cristales de cuarzo y estrechamiento de maclas de feldespatos, lo que permite inferir metamorfismo de grado bajo a medio con temperaturas de 400 – 500 °C. La roca caja corresponde a un micaesquisto biotítico, compuesto por bandas de distinta composición y diferente tamaño de grano, cuya foliación principal está marcada por bandas félsicas de dirección N72 y buzamiento 65° al S. Los granitos se encuentran recortados por pegmatitas compuestas por cuarzo, feldespato, muscovita, biotita y mica verde, y localmente por rocas básicas (gabro o microgabro) compuestos por abundante plagioclasa tabular, glomérulos de piroxenos y escaso cuarzo masivo (Gianotti & Arrighetti, 2017).

8.1.3 Granito Piedra Los Indios

En función de lo descrito por Gianotti & Arrighetti (2017) pueden diferenciarse dos tipos texturales: porfiroide e inequigranular. El granito porfiroide es la litología dominante, aflora en bochas alargadas con longitudes entre 7 a 12 m. Compuesto por fenocristales de feldespato alcalino de color blanco y blanco rosáceo de hasta 10 cm de largo, donde se distingue la predominancia unidireccional con orientación magmática. La dirección de la lineación de feldespato alcalino oscila en un rango de E–W $\pm 10^\circ$ a N50 y la dirección del plano de la foliación magmática es de N68E a N70E. Compuesto por minerales máficos, con biotita en abundancia y cuarzo. Localmente, el granito se encuentra recortado por filones de microgabro. En otras regiones el granito se presenta con matriz de grano medio a grueso. El granito inequigranular se manifiesta en forma de bochas y domos bien definidos, se trata de un granito isótropo, compuesto por feldespato alcalino (40 a 45%), cuarzo (25 a 30%) y biotita (25 a 35%). La biotita ocurre en gran abundancia en la matriz otorgándole un carácter mesócrata (Gianotti & Arrighetti, 2017).

8.2 Cenozoico

8.2.1 Formación Camacho

Caorsi & Goñi (1958) denominaron los depósitos como “Areniscas fosilíferas de Camacho” en base a descripciones litoestratigráficas en la cantera homónima, sugiriendo localidad y sección tipo sobre el Arroyo de las Víboras, entre las ciudades de Carmelo y Nueva Palmira, en el Departamento de Colonia.

Goso (1965) describe la unidad como integrada por “depósitos areno-arcillosos, en los que varía el contenido de cada fracción, de modo que se encuentran desde arcillas gris-verdosas, hasta arenas blancas bien seleccionadas, con litologías intermedias”, posteriormente Goso y Bossi (1966) otorgan el rango de Formación.

Sprechmann, Martínez & Gaucher (1994) presentan una columna estratigráfica detallada de la localidad de San Pedro con una potencia expuesta de 6 m. Indican depósitos pelíticos de coloración oliva claro y gris oliva claro, con abundancia de icnofósiles, en particular *Thalassinoides* y *Ophiomorpha nodosa*. Estos depósitos se intercalan con tempestitas, reconocibles como areniscas muy finas y finas de color gris muy claro, con coquinas dispuestas en estratos o en concreciones, y diversas estructuras sedimentarias, destacándose aquellas diagnósticas del tipo hummocky.

Martínez (1994) propone dividir la Formación Camacho en dos miembros informales: Miembro Cerro Bautista (Miembro Superior) y Miembro San Pedro (Miembro Inferior).

El Miembro Cerro Bautista se compone de areniscas finas a muy finas, blancas, maduras, con niveles más gruesos intercalados o subyacentes, muy ricos en fósiles. Puede existir en la base delgados paquetes de arcillitas gris verdosas, plásticas y macizas. Las estructuras sedimentarias se observan mayormente en los niveles de areniscas medias a

gruesas. La localidad y sección tipo se localiza al norte del Arroyo de las Víboras, entre las ciudades de Carmelo y Nueva Palmira, en el Departamento de Colonia.

El Miembro San Pedro integra mayormente limolitas arenosas verde grisáceas bioturbadas, con intercalación de niveles de arenisca generalmente delgados y muy ricos en fósiles. De manera excepcional pueden existir niveles de arcillas muy delgados. La localidad y sección tipo se ubica en la costa del Río de la Plata, al sur de la desembocadura del Arroyo San Pedro.

Perea y Martínez (2009) expresan que la Formación Camacho comprende una sucesión de areniscas desde muy finas a gruesas, limolitas y pelitas arcillosas y se distingue por su abundancia de fósiles.

Ugalde (2019) en función de varias localidades revisadas en los departamentos de Colonia y San José, expresa que la heterogeneidad faciológica permite sugerir que la segmentación en dos miembros propuesta por Martínez (1994) no reflejaría de forma adecuada a la unidad, por lo que considera innecesaria y poco práctica la subdivisión. Además, argumenta que los espesores de pocos metros de las secciones y las variaciones de facies en los ejes lateral y vertical hacen innecesaria la distinción.

Los afloramientos más significativos se extienden sobre las costas de los departamentos de San José y Colonia, ocurriendo también en Maldonado y Rocha, con potencia máxima en afloramientos de alrededor de 15 m (Perea y Martínez, 2009). Según Stoakes et al. (1991) y de Santa Ana & Ucha (1994), en la plataforma continental, las perforaciones Lobo I y Gaviotín I habrían atravesado más de 600 m, correspondientes a arcillitas fosilíferas marinas, intercaladas con areniscas que atribuyen a prodeltas.

El ambiente de sedimentación en el borde del territorio uruguayo y gran parte del territorio argentino corresponde a una transgresión marina denominada de modo informal como “mar entrerriense”, de acuerdo a evidencias bioestratigráficas e isotópicas aportadas por numerosos investigadores se instaló en el Mioceno Tardío (alrededor de 10 Ma) (Perea y Martínez, 2009). Según lo propuesto por Martínez (1994), el Miembro Cerro Bautista se depositó en un ambiente de plataforma, muy cercano a la costa, de aguas someras. Comprende canales de estuario, tempestitas muy proximales, depósitos intermareales y de playa. El Miembro San Pedro se depositó en un ambiente marino subtidal, indicado por icnofósiles y la propia litología, mientras que los niveles arenosos delgados ricos en fósiles son tempestitas. La presencia ocasional de arcillas se interpreta como momentos de baja energía.

La formación se apoya en forma discordante sobre el Basamento Cristalino o sobre la Formación Fray Bentos, mientras que en el tope se dispone en discordancia con la Formación Raigón, la Formación Libertad o con el suelo actual (Ugalde, 2019).

8.2.2 Formación Raigón

Goso (1965) define la Formación Raigón en las proximidades de la Estación Raigón, en el Departamento de San José. Está compuesta por areniscas finas a muy finas, bien seleccionadas, con cemento arcilloso en cantidades variables, masivas, de coloración gris claro y ocre; areniscas medias a gravillosas, regular a mal seleccionadas, subredondeadas a subangulosas, feldespáticas, con contenidos variables de arcilla, en colores blanco amarillento y rojizo; areniscas conglomerádicas y conglomerados polimícticos, subredondeados a subangulosos, con escaso contenido de arcilla; lentes y niveles de arcillas masivas, verdes y gris verdoso, con proporciones variables de fracción arena, hasta areniscas arcillosas. Es común la presencia de concreciones calcáreas. Este conjunto se dispone en forma interdigitada y groseramente rítmica, en niveles lentiformes con desarrollo de estratificación plano-paralela y cruzada. Las características litofaciológicas permiten asignarle una depositación en ambiente transicional y continental fluvial, en condiciones de clima semiárido (Preciozzi et al., 1985).

La unidad se encuentra ampliamente extendida en el departamento de San José, ocurriendo también en los departamentos de Canelones, Colonia, Montevideo y Florida, con potencias de aproximadamente 30 m (Spoturno et al., 2004).

La formación se apoya en forma discordante en el Basamento Cristalino, en la Formación Fray Bentos y en la Formación Camacho. Al tope es recubierto con discordancia por formaciones cuaternarias (Preciozzi et al., 1985; Perea y Martínez, 2009).

Perea y Martínez (2009) exponen que se han hallado pocos fósiles con significación estratigráfica regional. Datos expuestos por numerosos investigadores sugieren una edad desde el Plioceno Tardío al Pleistoceno Medio para los depósitos de la Formación Raigón.

8.2.3 Formación Libertad

Goso (1964) manifiesta dejar a un lado la denominación Loess de Arazatí propuesta por Caorsi & Goñi (1958), debido a que los resultados del relevamiento superficial y subsuperficial no concordaban con la descripción ni en la potencial sección tipo.

Goso (1965) define la Formación Libertad en la localidad homónima en el Departamento de San José, aflorando en el sector Sur del territorio uruguayo. Describe la unidad caracterizada por sedimentos limo-arcillosos con arena fina, media y gruesa, gravilla, grava y/o cantos dispersos, con coloraciones pardas verdosas a rojas y ausencia de estratificación. Presenta carbonato en forma pulverulenta, en concreciones y/o bancos de pequeño espesor. Los sedimentos han sido depositados en ambiente continental, en condiciones de aridez y relacionados a momentos glaciales. A su vez, se concibe momentos de clima húmedo asociados a interglaciales. La existencia de más de un evento glacial descrito para el Cuaternario en el mundo, conduce a la existencia de más de un Libertad, denominados Libertad I y Libertad II.

Posteriormente, Goso (1972) expone avances al estudio de la unidad y enuncia la existencia de Libertad I, Libertad II y Libertad III = Dolores. Consideraciones geomorfológicas indican que los depósitos continentales identificados como Libertad II, pasan a denominarse Dolores y Libertad I pasa a denominarse Libertad II.

Panario & Gutiérrez (1999) indican que hay dos formaciones loésicas, llamadas Libertad: Formación Libertad I y Formación Libertad II. La Formación Libertad I, material eólico del Pleistoceno Inferior, integra loess más o menos masivo y fuertemente calcáreo, cubre rocas de varias edades y ocurre en las cimas de las colinas en paisajes estables. Los parámetros sugieren deposición en condiciones climáticas secas y frías. La Formación Libertad II comprende loess con abundantes espículas de esponjas e incluye arena gruesa, grava y cantos rodados. Está enriquecida en minerales arcillosos, particularmente montmorillonita. No supera los 10 m de espesor, es retrabajada por el agua, contiene estructuras de suelo prismáticas, concreciones calcáreas, capas de arcilla y otros rasgos indicativos de procesos de lixiviación característicos de los horizontes B de los suelos. Las características mineralógicas y texturales del sedimento indican acumulación en condiciones cálidas y húmedas.

En general, se concuerda de que la Formación Libertad integra lodolitas, loess y arenas, de color pardo rojizo, con presencia de concreciones de carbonato de calcio, con espesores que no superan los 30 m (Martínez y Ubilla, 2009). Diversos estudios del sur y este del territorio uruguayo proporcionaron varias edades de radiocarbono de diferentes localidades, entre 20 – 30 ka, lo que permite atribuir a la Formación Libertad una edad Pleistoceno Superior (Ubilla & Martínez, 2016).

La formación se apoya en forma discordante sobre las formaciones del Terciario, Cretácico y del Proterozoico. En el tope la unidad es discordante, a través de los registros de entalles de erosión, con las formaciones del Pleistoceno Superior/Holoceno (Spoturno et al., 2004).

Bossi, Celio & Mármol (2016) muestran que se ha denominado «Formación Libertad» de forma indistinta a dos tipos de limos. El limo de la Carolina tiene 2 m de espesor, más de 40% de arena, gravilla abundante, esmectitas como mineral arcilloso dominante y formación de vertisoles. Bossi y Ortíz (2007) plantean designar a este limo como «Formación La Carolina». El otro limo posee hasta 20 m de espesor, menos de 25% de arena, gravilla ausente, illita como mineral arcilloso dominante y formación de brunsoles sobre dicho limo. A este limo se propone mantener el término «Formación Libertad», dicha unidad queda reducida a la meteorización de la Formación Raigón. Ambas formaciones se generaron por procesos diferentes, la que se plantea mantener como Formación Libertad proviene de limos eólicos edafizados durante el Pleistoceno y la que se propone nombrar como Formación La Carolina se genera por meteorización de rocas básicas (anfíbolitas, gabros, basaltos, entre otras), en condiciones de clima templado y húmedo (Bossi, Celio & Mármol, 2016).

9. ANTECEDENTES HIDROGEOLÓGICOS

El territorio uruguayo se divide en tres Provincias Hidrogeológicas: Provincia Hidrogeológica Paranaense, Provincia Hidrogeológica Meridional y Provincia Hidrogeológica Costera, según la Carta Hidrogeológica del Uruguay a escala 1:2.000.000 (Heinzen et al., 1986). A su vez, cada provincia se divide en subprovincias en función del comportamiento hidrogeológico de los materiales del subsuelo a nivel local (Fig. 6) (Montaño et al., 2006).

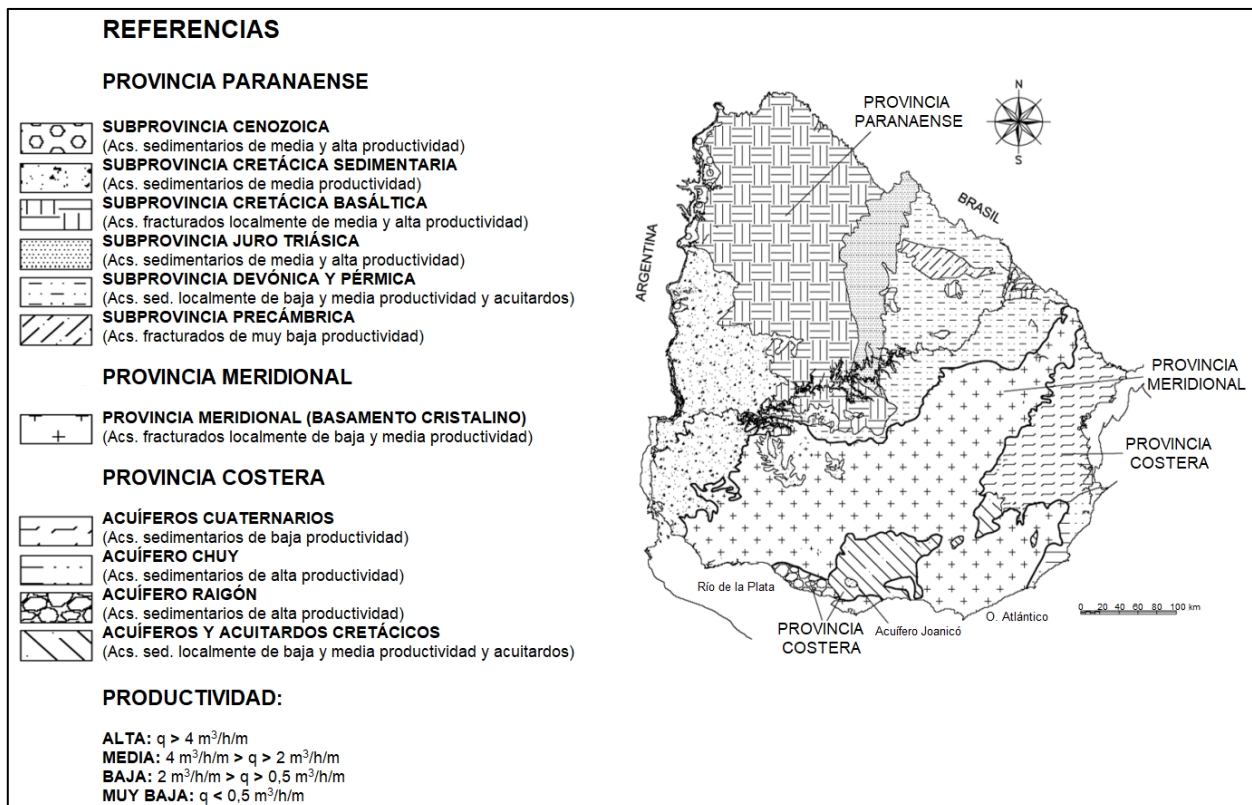


Figura 6. Mapa de Provincias Hidrogeológicas del Uruguay. Modificado de Montaño et al. (2006).

El área de estudio se encuentra localizada en la Provincia Hidrogeológica Meridional, integra todas las rocas precámbricas (excepto la Subprovincia Precámbrica incluida en la Provincia Paranaense), las cuales desde un punto de vista hidrogeológico poseen un comportamiento heterogéneo, conformando sistemas acuíferos fracturados. Las características de estos sistemas para toda la región son muy cambiantes y su caracterización debe realizarse localmente (Montaño et al., 2006).

Por otra parte, de acuerdo con el Mapa Hidrogeológico del Uruguay a escala 1:1.000.000 (Heinzen et al., 2003), el área de estudio comprende los denominados acuíferos en rocas con porosidad por fracturas con alta a media posibilidad para agua subterránea (Fig. 7). La Unidad Hidrogeológica Paleoproterozoica se desarrolla en el Sur y Suroeste del país, se encuentra integrada por gneisses, granitos, micaesquistos y anfibolitas. Los caudales específicos son de aproximadamente $1,0 \text{ m}^3/\text{h/m}$ y el residuo seco promedio es alrededor de 500 mg/L (Heinzen et al., 2003).

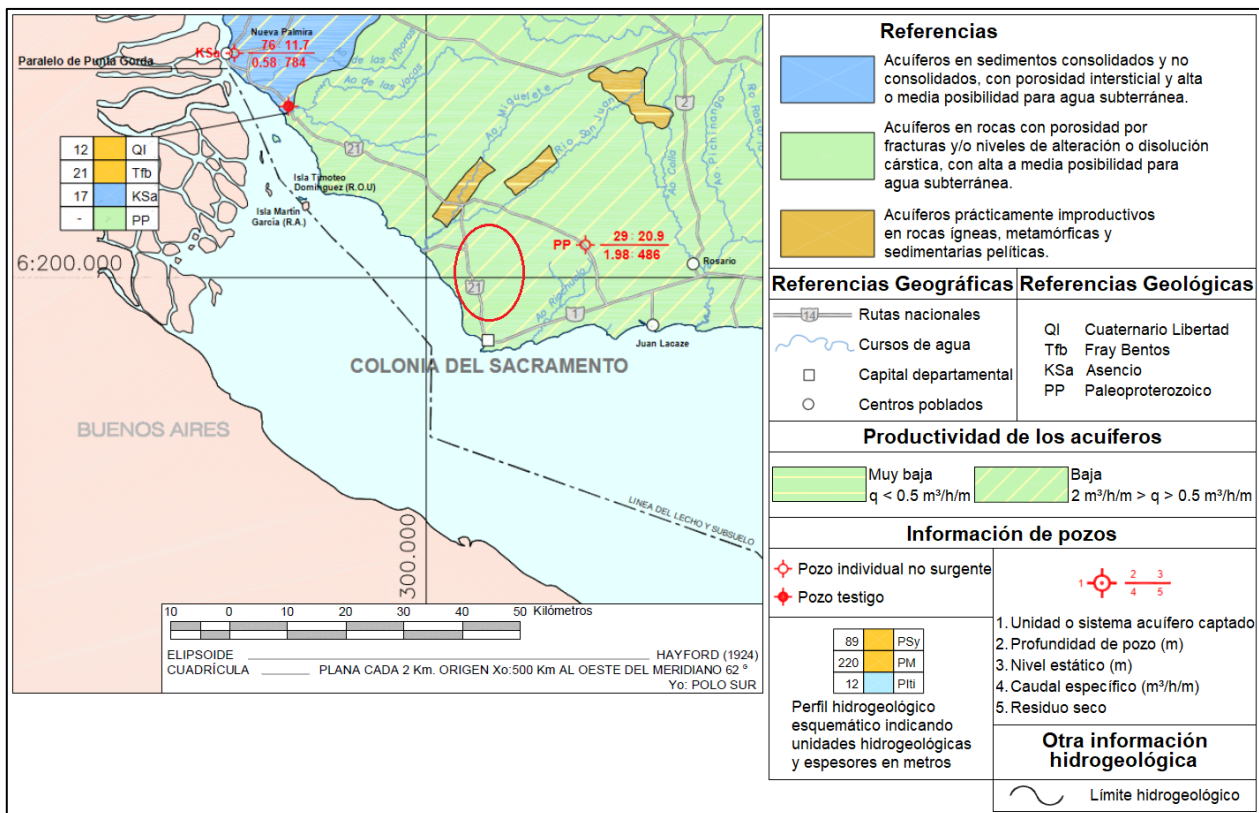


Figura 7. Sección del Mapa Hidrogeológico del Uruguay (área de estudio marcado en rojo). Modificado de Heinzen et al. (2003).

9.1 Acuífero fracturado

Los acuíferos fracturados comprenden más del 65% del territorio uruguayo, son sistemas complejos, donde el agua se almacena y circula en fracturas, diaclasas y/o fallas interconectadas. Algunos ejemplos de rocas que constituyen este sistema en Uruguay son granitos, basaltos, cuarcitas y gneiss, con valores de porosidad y permeabilidad muy diversos. En el área de estudio los granitos constituyen estos tipos de acuíferos.

Según Montañó (1999) la capacidad de almacenamiento de la unidad acuífera del Basamento Cristalino depende de los siguientes factores: i) tipo y tamaño de fractura, ii) interconexión de fracturas, iii) tipo de roca donde se produce la fracturación, y iv) porosidad de fractura (relacionado a los procesos de alteración mecánica, química y biológica).

Respecto al primer punto el autor diferencia cuatro tipos de fracturas diferentes:

- Diaclasas de tensión: se presentan como fracturas aisladas que se localizan en las crestas y los senos de pliegues isoclinales, producen una escasa o nula interconexión entre fracturas, constituyen acuíferos pobres dado el limitado almacenamiento y área de recarga (Montañó, 1999).

- Fracturas de tensión: conforma redes de fracturas interconectadas generando gran capacidad de almacenamiento, transforma a la roca en un buen acuífero (Montaño, 1999).
- Fracturas de corrimiento: en algunos casos las fracturas están casi cerradas por el efecto de presiones residuales, que limitan el espacio entre bloques. En otros, puede existir una fuerte fracturación que origina diferentes tamaños de grano en función de la mecánica del fallamiento, del comportamiento de la roca y de los procesos de alteración, dando lugar a la formación de arcillas que limitan la permeabilidad o a la formación de arenas, que mejoran las cualidades hidrogeológicas, constituyendo buenos acuíferos. Puede suceder que dos o más fallas de corrimiento se corten formando un eje de intersección creando grandes espacios lo que permite caudales excepcionales (Montaño, 1999).
- Fracturación por descompresión: se generan debido a la pérdida de carga litostática por erosión de los materiales superpuestos, producen una serie de fracturas horizontales o subhorizontales paralelas a la superficie que funcionan como colectores del flujo circulante desde las fracturas verticales (Montaño, 1999).

Según Gustafson y Krásný (1994) las estructuras que permiten la acumulación y movimiento del agua en rocas cristalinas ígneas y metamórficas se definen como conductores hidráulicos, a diferencia de los medios con porosidad primaria donde el término es acuífero. La denominación de conductor hidráulico podría ser aplicada para sistemas “pozo-bloque-fracturas asociadas” donde el primero no sólo constituye una obra para captación, sino que puede conectar estructuras con potenciales hidráulicos muy diferentes (Montaño, 1999).

Las fallas, diaclasas y fracturas pueden tener origen tectónico o no, las primeras se originan como consecuencia de esfuerzos que experimenta un subsuelo cristalino, generando macroestructuras con espacio suficiente que posibilita el almacenamiento y circulación del agua subterránea. Las de origen no tectónico se encuentran representadas mayormente por fracturas y/o diaclasas causadas por el alivio y/o descompresión producto de la erosión de su cobertura (Montaño, 2013).

Generalmente los niveles de alteración del Basamento Cristalino presentan poco espesor, inferior a cinco metros, sin posibilidades de un almacenamiento significativo. Por consiguiente, la capacidad de almacenamiento de estos tipos de acuíferos depende principalmente de la porosidad de fractura (Montaño, 1999). La recarga proviene de la transferencia vertical a través de la Formación Libertad cuando ésta lo recubre y el aporte de arroyos y cañadas encauzadas en fracturas. La Formación Libertad presenta una permeabilidad muy baja, aunque su gran extensión areal permite transferir un volumen importante hacia el sistema fracturado (Montaño, 1999).

Rodríguez et al. (2017) efectúan ensayos de campo y toma de muestras para su análisis en laboratorio de los sedimentos correspondientes a la Formación Libertad, en el Departamento de San José. Realizan pozos de muestreo de hasta 3 m de profundidad, a

partir de curvas granulométricas obtenidas para diferentes profundidades, observan un predominio de limo (> 58%), arcilla (23 – 40%) y arena fina (< 15%). Obtienen conductividades hidráulicas en el laboratorio por ensayos de carga constante que oscilan entre 10^{-9} y 10^{-10} m/s, mientras que los valores de infiltración en campo por ensayos de doble anillo, se presentan entre 10^{-7} y 10^{-8} m/s.

Es común la diferencia entre los valores obtenidos en ensayos de laboratorio y campo debido a las condiciones que presenta la estructura del suelo en campo, por ejemplo macroporos o fisuras, que no aparecen reflejadas en los ensayos de laboratorio. Los autores señalan que los valores de infiltración en campo son cien veces mayores que las conductividades hidráulicas obtenidas en el laboratorio. Por tanto, las características texturales y mineralógicas (principalmente esmectitas) no serían favorables al movimiento del agua a través de ella.

9.2 Acuífero sedimentario

Los acuíferos sedimentarios son aquellas unidades sedimentarias detríticas que poseen buena porosidad y permeabilidad alojando el agua en los poros, presentándose en el territorio uruguayo con variada potencialidad. El Sistema Acuífero Raigón se clasifica como un acuífero sedimentario definido como del tipo multicapa, variando desde libre a semiconfinado, teniendo como base las formaciones Camacho o Fray Bentos y como techo las formaciones Libertad o Dolores, cuando estas existen (Postiglione et al., 2009).

En función de sondeos eléctricos verticales efectuados en la localidad de San Pedro en el Departamento de Colonia (Cicalese, 1998), es posible interpretar cinco capas, siendo las dos primeras de poca profundidad, sin interés desde el punto de vista hídrico. La tercera capa, de resistividad media de 32 - 33 $\Omega \cdot m$, es la que aporta agua en los pozos, con espesores que oscilan entre 4 a 11 m y profundidades que varían desde 1,5 a 12 m. La cuarta capa es de muy baja resistividad (5 - 6 $\Omega \cdot m$), se presenta a profundidades que varían desde 7 a 44 m, siendo característica de agua con elevado contenido de sales disueltas. Por debajo de esta capa se encuentran resistividades muy elevadas que son características de rocas cristalinas y con mínimas o nulas posibilidades de circulación de agua.

Valores elevados de conductividad eléctrica registrados en el área de estudio, tal como varios pozos del poblado MEVIR, están asociados a sedimentos de la Formación Camacho. Como se menciona en Goso Aguilar y Muzio (2006), el análisis del agua subterránea ha expuesto valores elevados en cloruros, probablemente debido a que esta formación geológica fue depositada en condiciones marino-litorales.

10. RESULTADOS

10.1 Geología del área de estudio

10.1.1 Granitos paleoproterozoicos

Los afloramientos de granito únicamente han sido reconocidos al Este y Sureste del área de estudio, en canteras artesanales de escasa extensión. Los cuerpos graníticos se presentan con alteración meteórica, poco fracturados y con ligera deformación (Fig. 8 A y F).

En muestra de mano se trata de un granito leucócrata de color blanco grisáceo, presenta textura holocristalina, fanerítica, equigranular, hipidiomórfica, de tamaño medio. Se encuentra compuesta por cuarzo, plagioclasa, biotita y feldespato alcalino (Fig. 8D). En otras áreas de la cantera se presenta una variación del granito, en muestra de mano es leucócrata de color blanco grisáceo, de textura holocristalina, fanerítica, isótropa, inequigranular, hipidiomórfica, de tamaño medio a grueso. Se encuentra compuesta mayormente por cuarzo, biotita, plagioclasa y feldespato alcalino (Fig. 8E).

El cuerpo granítico se encuentra recortado por numerosos diques, compuestos principalmente por cuarzo y presentan anchos de hasta 40 cm, a su vez son afectados por fallas de dirección general NE – SW a E – W (Fig. 8 B y C).

10.1.2 Formación Camacho

La unidad presenta buena exposición en las barrancas localizadas en el Balneario Brisas del Plata, al Oeste del área de estudio (Fig. 9 A y B). Esta formación se encuentra constituida por limolitas de coloración gris claro, consolidadas, presentan concreciones esféricas y ovaladas de color blanco de hasta 30 cm de largo, impresiones de bivalvos de hasta 4 cm y se observa la presencia de *Thalassinoides* (Fig. 9 C y D). Ugalde (2019) observa la intercalación de estos depósitos con areniscas muy finas en estratos de 20 – 50 cm, de origen tempestítico. La unidad se presenta con potencia expuesta de hasta 7 m.

10.1.3 Formación Raigón

La unidad se reconoce en las barrancas localizadas en el Balneario Brisas del Plata, suprayacente a la Formación Camacho en contacto erosivo. Se observa areniscas que poseen granulometría variable, desde arena fina a muy gruesa, con clastos de sábulos dispersos, de tonalidad marrón claro, poco consolidada y moderadamente a mal seleccionada. Presentan textura clasto soportada, los granos son principalmente subangulosos a subredondeados. La composición es mayormente cuarzo-feldespática, con fragmentos líticos (Fig. 9E). La formación se presenta con potencia de hasta 4 m en afloramientos y se encuentra en forma interdigitada, con secuencias de niveles medios y gruesos.

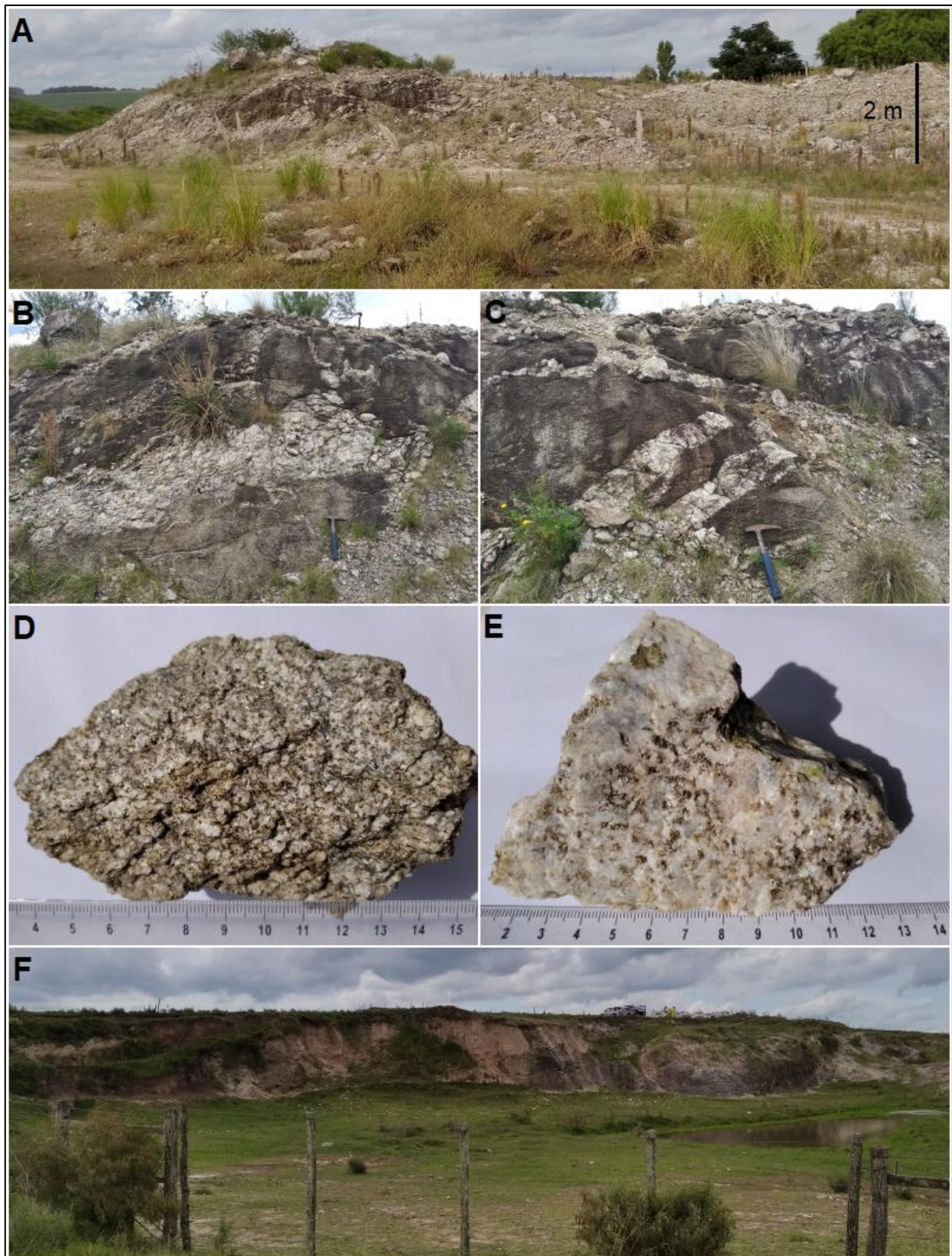


Figura 8. A: Vista general de afloramiento. B y C: Detalle de afloramiento. D y E: Muestra de mano de granito. F: Vista general de afloramiento.



Figura 9. A y B: Vista general de barrancas en Balneario Brisas del Plata. C: Detalle de limolitas con concreciones calcáreas (Formación Camacho). D: Muestra de mano de limolita. E: Muestra de mano de arenisca (Formación Raigón).

10.2 Hidrogeología

En el área de estudio se reconocieron dos unidades acuíferas, una unidad acuífera constituida por granitos pertenecientes al Basamento Cristalino, conformando un acuífero de tipo fracturado y otra unidad acuífera constituida por la Formación Raigón, conformando un acuífero de tipo sedimentario. La Formación Libertad según sus características litológicas se comporta como un acuícludo, mientras que según Montañó (1999) en la Cuenca del Arroyo Carrasco en el Departamento de Montevideo se comportaría como un acuitardo. La Formación Libertad en el área de estudio cubre un 40% de ambos acuíferos, otorgándoles una protección natural frente a los potenciales contaminantes.

Para analizar el comportamiento hidráulico en ambos acuíferos se realizó el censo de puntos de agua, con un total de 32 pozos relevados. A partir del inventario de pozos, se obtuvieron datos de ubicación, profundidad total, profundidad del nivel de agua y caudal estimativo, como datos constructivos y fundamentales, para determinar profundidad de fracturas, direcciones de flujo, entre otros. Los pozos censados se identificaron con sigla y número (Fig. 10) y se presentan en el Anexo II.

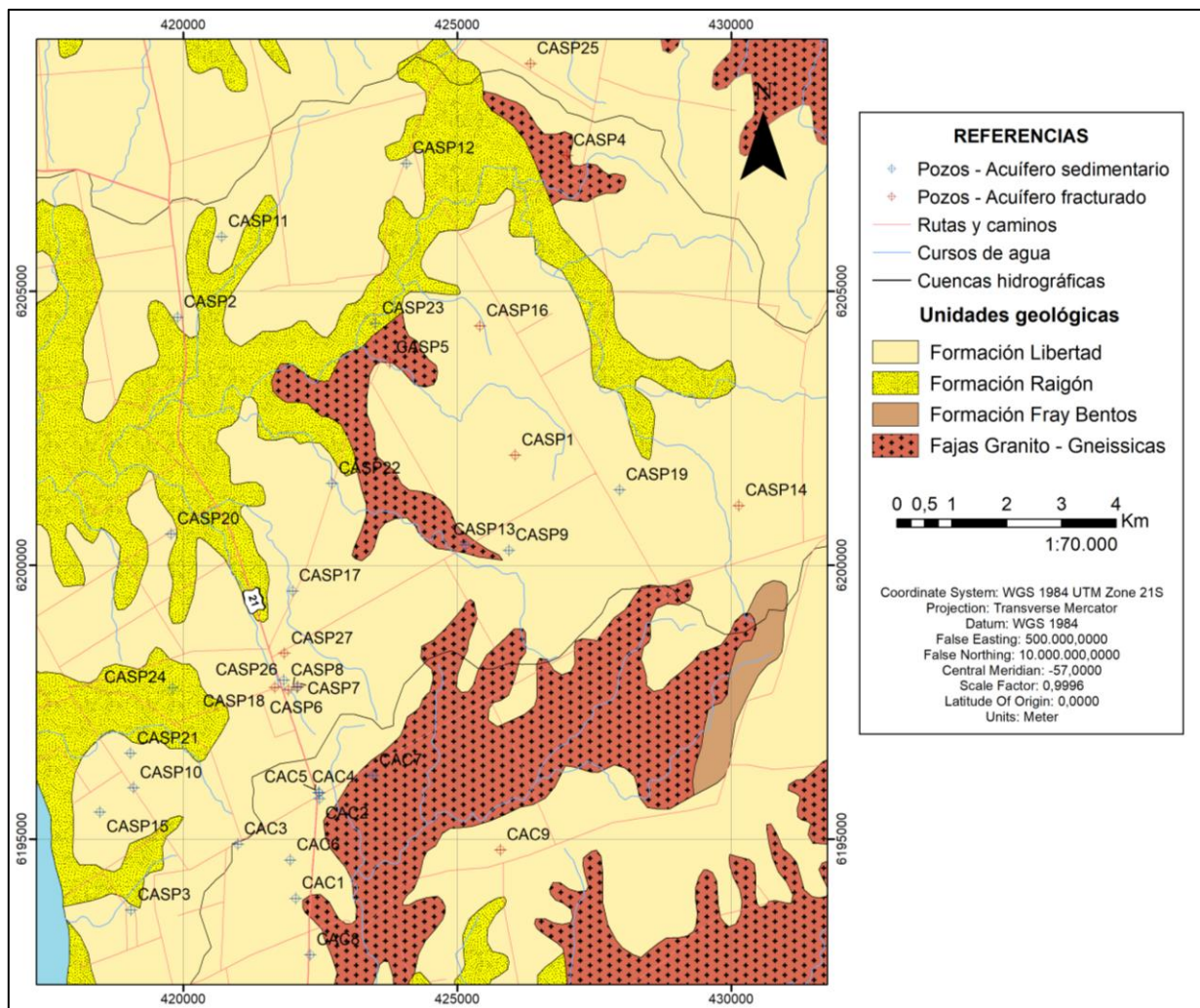


Figura 10. Mapa de pozos del área de estudio.

10.2.1 Acuífero fracturado – Granitos paleoproterozoicos

El acuífero fracturado se extiende en toda el área de estudio, aflorando hacia el Este, con una extensión superficial aproximada de 30%, con comportamiento de acuífero libre. Hacia el Norte y Oeste de la zona de estudio se encuentra cubierto por la Formación Raigón en un 30% y por la Formación Libertad en un 40%, comportándose como un acuífero de tipo confinado a semiconfinado. Las direcciones principales de fracturas son NE–SW. El agua subterránea de este acuífero se utiliza principalmente para abastecimiento humano en escuelas rurales, poblado de MEVIR y tambos ubicados sobre éste.

Del inventario de pozos se analizó la profundidad total de pozos, profundidad de fracturas, nivel de agua en el pozo y caudales estimados, su análisis se detalla a continuación.

Profundidad total de pozos (m)

Del análisis surge que el valor medio de profundidad total de pozos es de 35,25 m, con un valor máximo de 48 m en el pozo *CASP4* y un valor mínimo de 20 m en el pozo *CASP6*. De acuerdo al análisis de los datos de profundidad total de pozos, se puede determinar que las fracturas con aporte de agua se encuentran entre 20 m y 48 m. El gráfico que se presenta a continuación muestra la frecuencia de profundidad total de pozos analizada (Fig. 11).

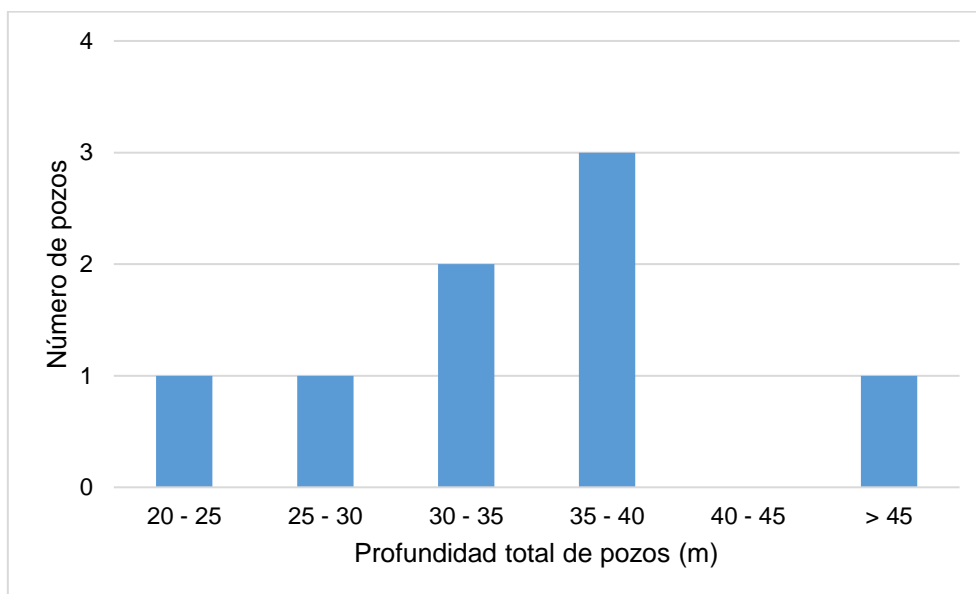


Figura 11. Frecuencia de profundidad total de pozos (m). Acuífero fracturado (n = 8).

Caudal (m³/h)

Se toma como dato de caudal el proporcionado por el propietario del pozo y se refiere al caudal de uso. Para esta investigación no se realizaron ensayos de eficiencia de pozos, metodología para estimar el caudal óptimo. Hay que destacar que el caudal depende del estado constructivo de los pozos, en caso de pozos totalmente entubados, de la profundidad de colocación de la bomba, de las distancias para llevar el agua, de la potencia y de la regulación de la bomba.

Los datos proporcionados por los propietarios de los pozos fueron graficados, obteniendo un valor medio de 7,55 m³/h, un valor máximo de 12 m³/h en los pozos *CASP1* y *CASP18* y un valor mínimo de 3 m³/h en el pozo *CASP25* (Fig. 12).

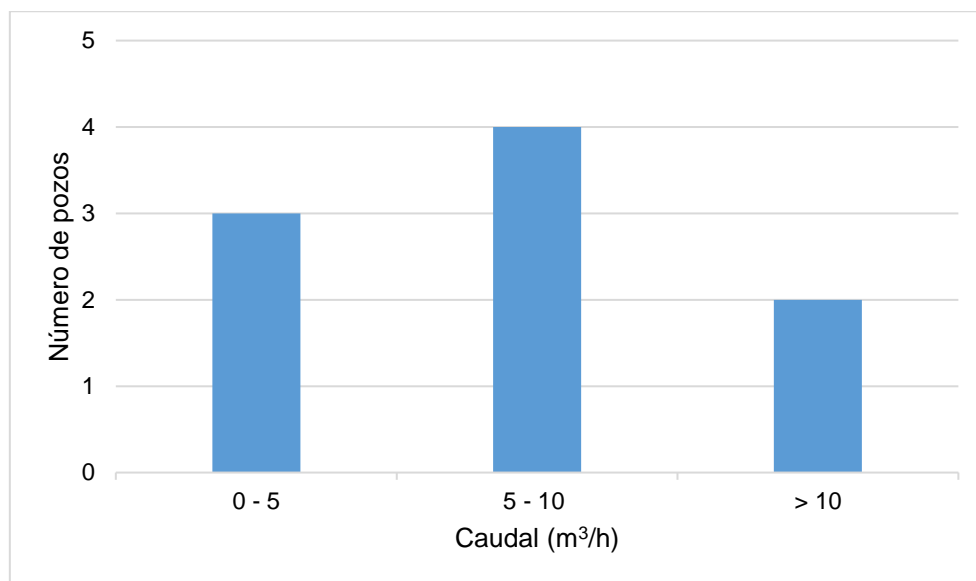


Figura 12. Frecuencia de caudal (m³/h). Acuífero fracturado (n = 9).

Para determinar la existencia de tendencias o relaciones entre el caudal y la profundidad total de pozos se realizó un gráfico con estos valores, observándose que existe una leve tendencia de aumento de caudal cuando aumenta la profundidad (Fig. 13). También se observa que para una misma profundidad total de pozos de 40 m existen caudales muy disimiles, confirmando el concepto de conductor hidráulico (Montaño, 1999), que la fracturación es un fenómeno sectorizado.

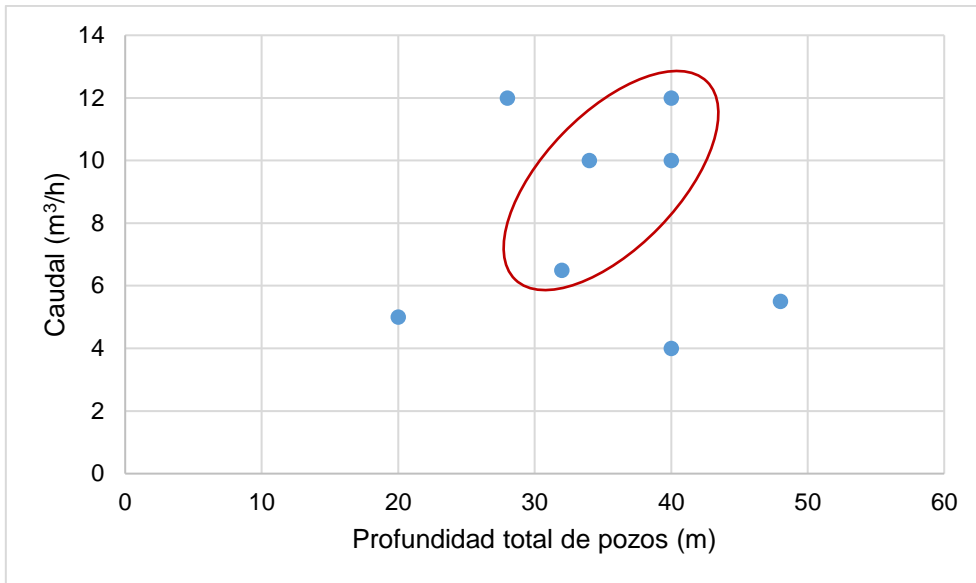


Figura 13. Caudal vs Profundidad total de pozos. Acuífero fracturado.

Nivel estático (m)

Del análisis se observa que el valor medio de nivel estático es de 6,79 m, con un valor máximo de 19,17 m en el pozo *CASP4* y un valor mínimo de 0,78 m en el pozo *CASP5*. El gráfico que se presenta a continuación muestra la frecuencia de nivel estático analizada (Fig. 14). Este dato es imprescindible junto con la cota del terreno para poder realizar el mapa piezométrico del acuífero investigado.

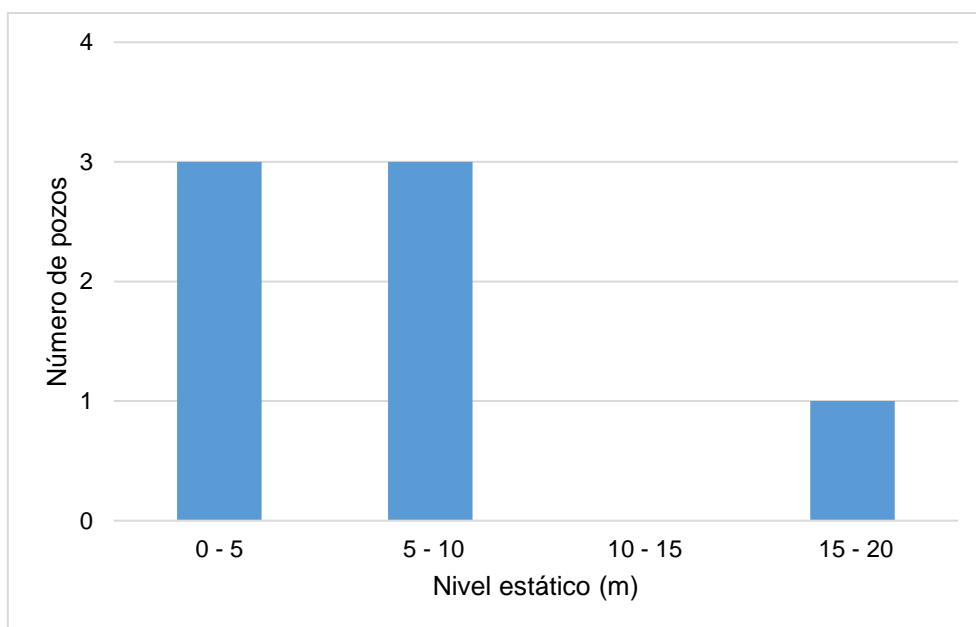


Figura 14. Frecuencia de nivel estático (m). Acuífero fracturado (n = 7).

10.2.2 Acuífero sedimentario – Formación Raigón

La Formación Raigón constituye el acuífero sedimentario más importante del área de estudio, presentando niveles de areniscas permeables con niveles de arcillas. El espesor de la unidad varía en el área de estudio, desde unos 10 m en promedio hasta desaparecer hacia el Noroeste. Su distribución abarca la mayor parte del área de estudio y suprayace los granitos correspondientes al Basamento Cristalino. Presenta un comportamiento de acuífero libre en su porción aflorante, a lo largo de la costa y en los márgenes del Arroyo San Pedro, con cota de hasta 60 msnm. Se comporta como acuífero semiconfinado cuando se encuentra cubierto por la Formación Libertad, abarcando una extensión superficial aproximada de 40%.

Al igual que para el acuífero fracturado, a partir del inventario de pozos, se analizó la profundidad total de pozos, nivel estático y caudales estimados. Se contabilizaron 25 pozos, de los cuales 13 son brocales y 12 son semisurgentes. Los pozos brocales se distribuyen principalmente en el sector Sur del área de estudio, se observan generalmente en las cotas más altas con valores de hasta 61 msnm, donde los espesores se hacen más potentes y principalmente se utilizan para uso doméstico y secundariamente tambo. Mayormente se encuentran cercanos a las viviendas, a menos de 10 m de distancia. Los pozos semisurgentes se encuentran localizados principalmente en el sector Suroeste del área de estudio, se observan en cotas topográficas que varían entre 17 y 60 msnm y se utilizan para uso doméstico y tambo. Mayormente se encuentran cercanos a las viviendas, a menos de 10 m de distancia, algunos se encuentran a más de 30 m y otros muy cercanos a ganado o a las instalaciones del tambo. A continuación se analizan ambos tipos de construcción de pozos.



Figura 15. Pozo brocal (izquierda), pozo semisurgente (derecha).

Pozos brocales

Profundidad total de pozos (m)

Del análisis surge que el valor medio de profundidad total de pozos es de 13,03 m, con un valor máximo de 27,36 m en el pozo *CAC1* y un valor mínimo de 3,9 m en el pozo *CAC8*, ubicándose ambos en el sector Sur del área de estudio. Generalmente, los pozos que presentan mayor profundidad total ocurren en zonas topográficas más altas. Los pozos brocales no presentan una distribución uniforme en el área de estudio, por lo que no es preciso indicar zonas de mayor o menor profundidad total.

Caudal (m³/h)

Sólo se pudo obtener dos datos de caudal proporcionados por los propietarios del pozo, cuyos valores son 0,7 m³/h en el pozo *CASP9* y 2 m³/h en el pozo *CASP3*, ubicados al Este y Oeste del área de estudio, respectivamente.

Nivel estático (m)

Del análisis se observa que el valor medio de nivel estático es de 9,35 m, con un valor máximo de 19,77 m en el pozo *CAC1* y un valor mínimo de 1,69 m en el pozo *CAC8*, ambos ubicados en el sector Sur del área de estudio. No es posible observar una distribución uniforme en la zona de niveles estáticos someros y profundos. Los datos de nivel estático son de gran importancia junto con la cota del terreno para poder realizar el mapa piezométrico del acuífero investigado.

Pozos semisurgentes

Profundidad total de pozos (m)

Del análisis surge que el valor medio de profundidad total de pozos es de 27 m, con un valor máximo de 37 m en el pozo *CASP19* y un valor mínimo de 15 m en el pozo *CASP21*, ubicados al Este y Oeste del área de estudio, respectivamente. Los pozos semisurgentes no presentan una distribución uniforme en el área de estudio, por lo que no es posible indicar zonas que presenten mayor o menor profundidad total. El gráfico que se presenta a continuación muestra la frecuencia de profundidad total de pozos analizada (Fig. 16).

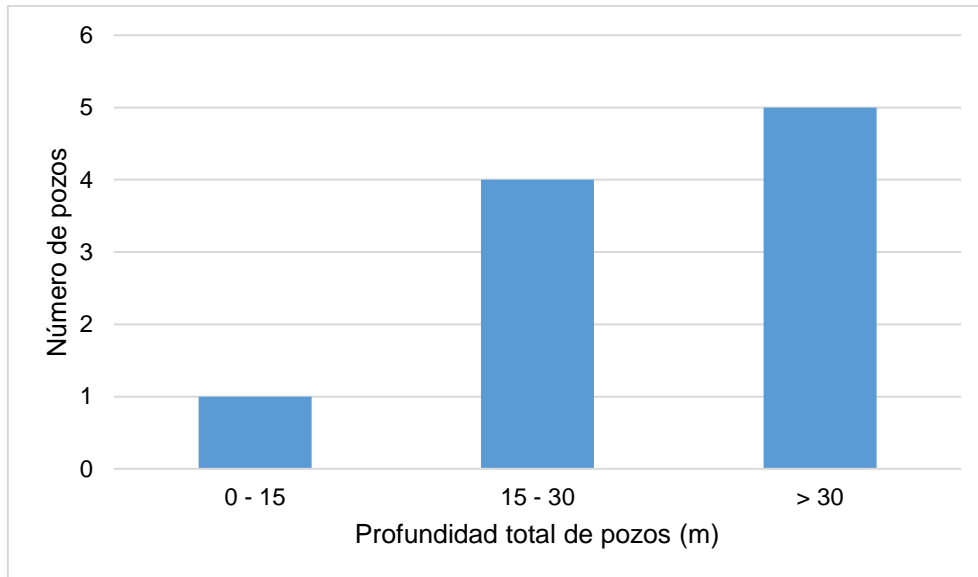


Figura 16. Frecuencia de profundidad total de pozos (m). Pozos semisurgentes. Acuífero sedimentario (n = 10).

Caudal (m³/h)

Se desprende de los datos proporcionados por los propietarios del pozo que el valor medio de caudal es de 3,65 m³/h, con un valor máximo de 6 m³/h en el pozo *CASP20* y un valor mínimo de 1,8 m³/h en el pozo *CAC4* (Fig. 17).

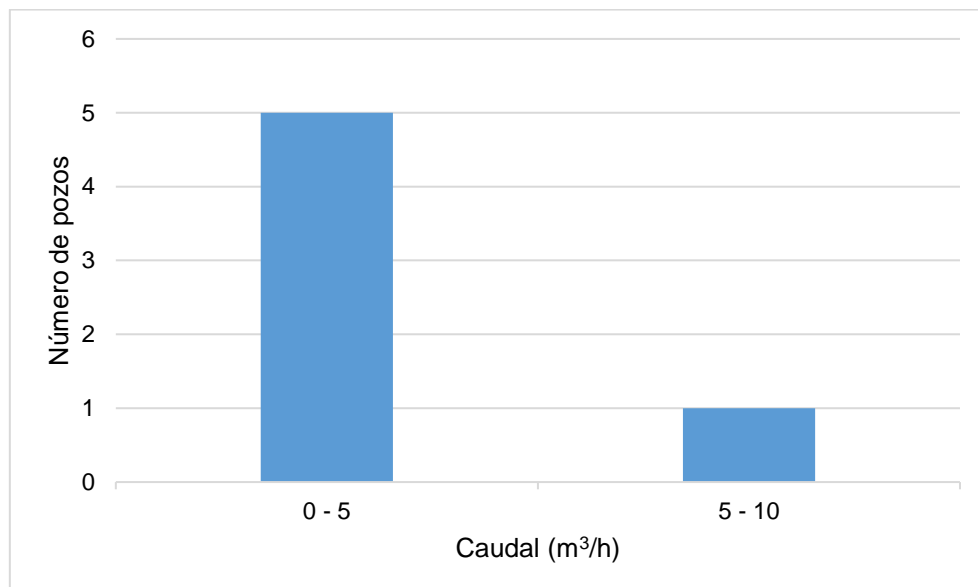


Figura 17. Frecuencia de caudal (m³/h). Pozos semisurgentes. Acuífero sedimentario (n = 6).

A partir de los datos obtenidos de profundidad total de pozos y los valores de caudal proporcionados por los propietarios del pozo se realizó un gráfico, para determinar la existencia de tendencias o relaciones entre ambos (Fig. 18). En el siguiente grafico se observa una tendencia de aumento de caudal cuando aumenta la profundidad, existen pozos con valores de caudales similares que presentan profundidades diferentes.

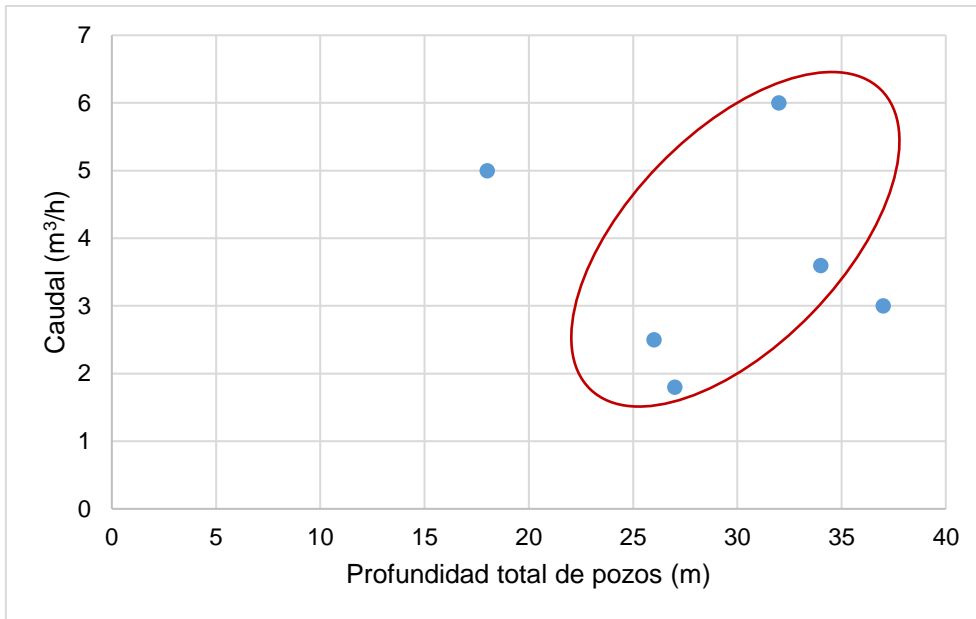


Figura 18. Caudal vs Profundidad total de pozos. Acuífero sedimentario.

Nivel estático (m)

Del análisis se observa que el valor medio de nivel estático es de 7,24 m, con un valor máximo de 9,5 m en el pozo *CASP15* y un valor mínimo de 2,64 m en el pozo *CASP22*, ubicados al Suroeste y Norte del área de estudio, respectivamente. La mitad de los pozos se encuentran sellados, por lo que no es posible observar zonas con niveles estáticos someros y profundos. El gráfico que se presenta a continuación muestra la frecuencia de nivel estático analizada (Fig. 19). Este dato es sustancial junto con la cota del terreno para poder realizar el mapa piezométrico del acuífero investigado.

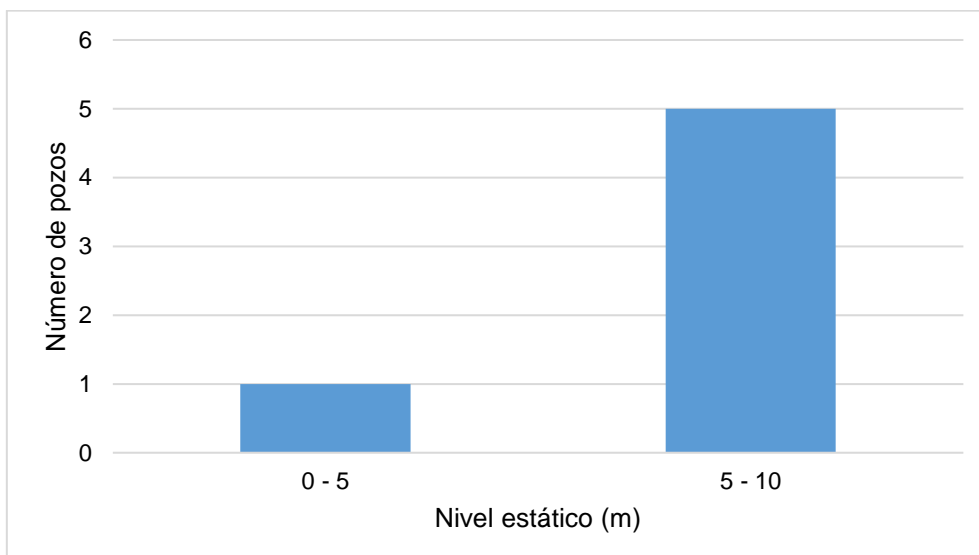


Figura 19. Frecuencia de nivel estático (m). Acuífero sedimentario (n = 6).

10.2.3 Piezometría

A través de la representación de curvas que unen puntos de igual altura piezométrica, denominadas isopiezas, es posible analizar la dirección de flujo, ubicación de zonas de recarga y descarga, gradientes hidráulicos y relacionar los resultados de los análisis químicos y parámetros fisicoquímicos.

Se elaboraron dos mapas piezométricos correspondientes a los acuíferos fracturado y sedimentario para el mes de mayo del año 2021. Cabe agregar que a partir del total de 11 pozos correspondientes al acuífero fracturado se obtuvieron 7 datos de niveles piezométricos ya que los restantes estaban sellados, impidiendo la medición de los mismos. Lo mismo sucede con los correspondientes al acuífero sedimentario, de la totalidad de 25 pozos se obtuvieron 18 datos de profundidad de nivel de agua.

Acuífero fracturado

En el mapa piezométrico del acuífero fracturado se observa que el flujo del agua subterránea presenta dirección SE – NW (Fig. 20). A grandes rasgos el tipo de superficie piezométrica es plana, aunque detalladamente se puede diferenciar en el sector centro-Este del área de estudio una superficie piezométrica levemente radial divergente, con cota de isopieza de 45 m (pozo *CASP1*), con un gradiente hidráulico en esta zona de 0,004 (i_2) y 0,005 (i_4), indicando un ámbito de recarga.

Los gradientes hidráulicos son más elevados en el sector centro-Oeste del área de estudio, presentando valores de 0,005 (i_3) y 0,007 (i_1), y en el sector Suroeste con valor de 0,009 (i_8), indicando zonas de descarga vinculadas con la existencia de bombeos. En el sector centro-Sur del área de estudio los gradientes hidráulicos presentan valores similares: 0,0051 (i_7), 0,0052 (i_6) y 0,0055 (i_5).

Acuífero sedimentario

En el mapa piezométrico del acuífero sedimentario se observa que el flujo del agua subterránea presenta dirección general SE – NW en el Norte y NE – SW en el Sur (Fig. 21). En el sector Oeste del área de estudio, en la porción más al Noreste de dicho sector, el tipo de superficie piezométrica es radial convergente (isopiezas cóncavas desde aguas abajo), mientras que en la porción más al Sureste de dicho sector es radial divergente (isopiezas convexas desde aguas abajo). En este sector se observa una cota de isopieza de 12 m (pozo *CASP20*), con un gradiente hidráulico de 0,003 (i_1) y 0,005 (i_5), y se corresponde a una zona de descarga donde el flujo subterráneo presenta direcciones al Oeste hacia el Arroyo San Pedro.

En el sector Este del área de estudio el tipo de superficie piezométrica es radial convergente, con cota de isopieza de 52 m (pozo *CASP19*), presentando un gradiente hidráulico de 0,004 (i_4), dando lugar a una zona de recarga.

En el sector central entre los dos ámbitos se observa en la zona Norte un gradiente hidráulico de 0,007 (i_3) y 0,008 (i_2), en la zona central valores de 0,006 (i_6) y 0,007 (i_7), y en la zona Sur valores de 0,013 (i_8), 0,020 (i_9), indicando esta última una zona de descarga.

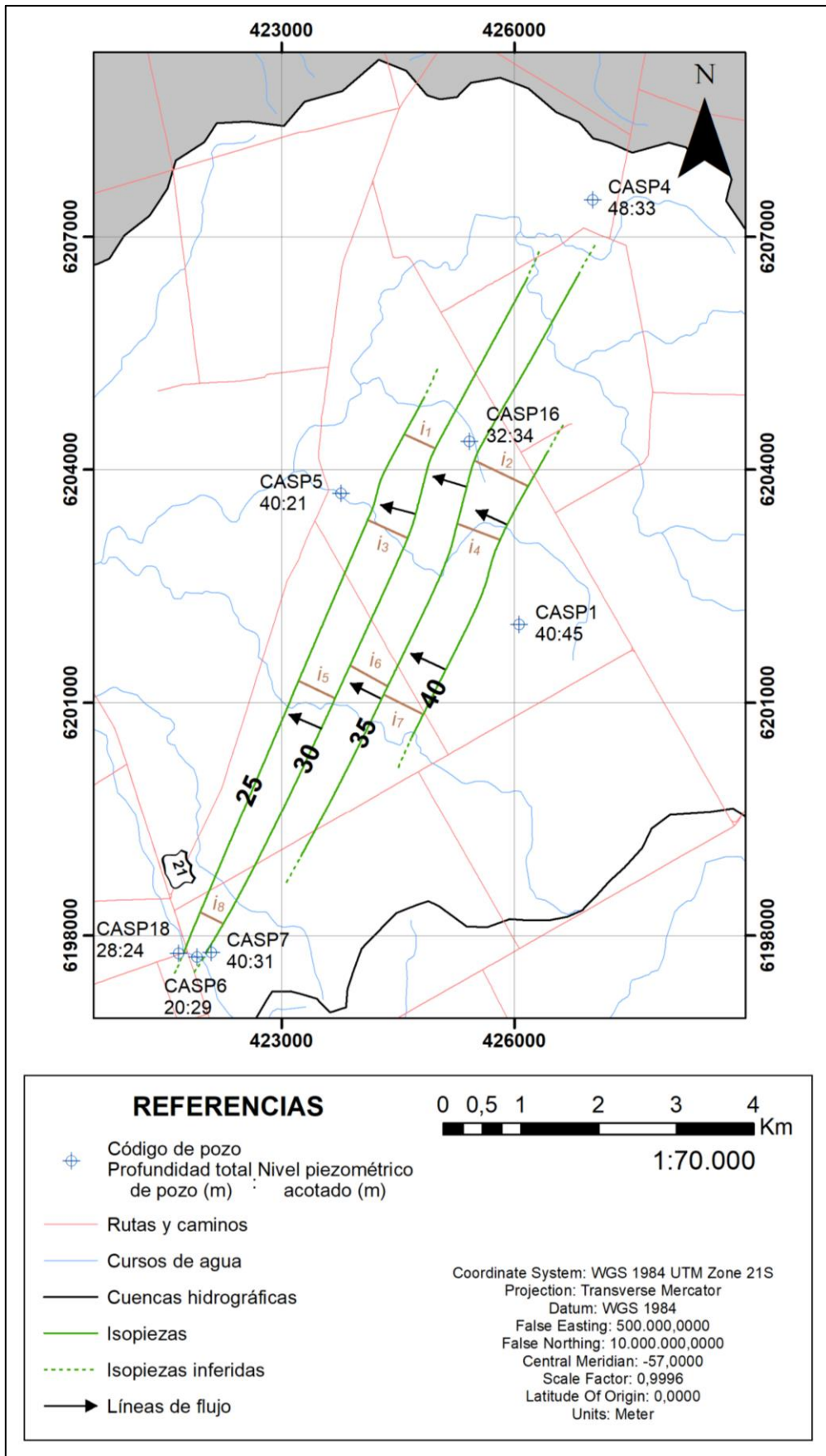


Figura 20. Mapa piezométrico del acuífero fracturado. San Pedro, Colonia. Mayo 2021.

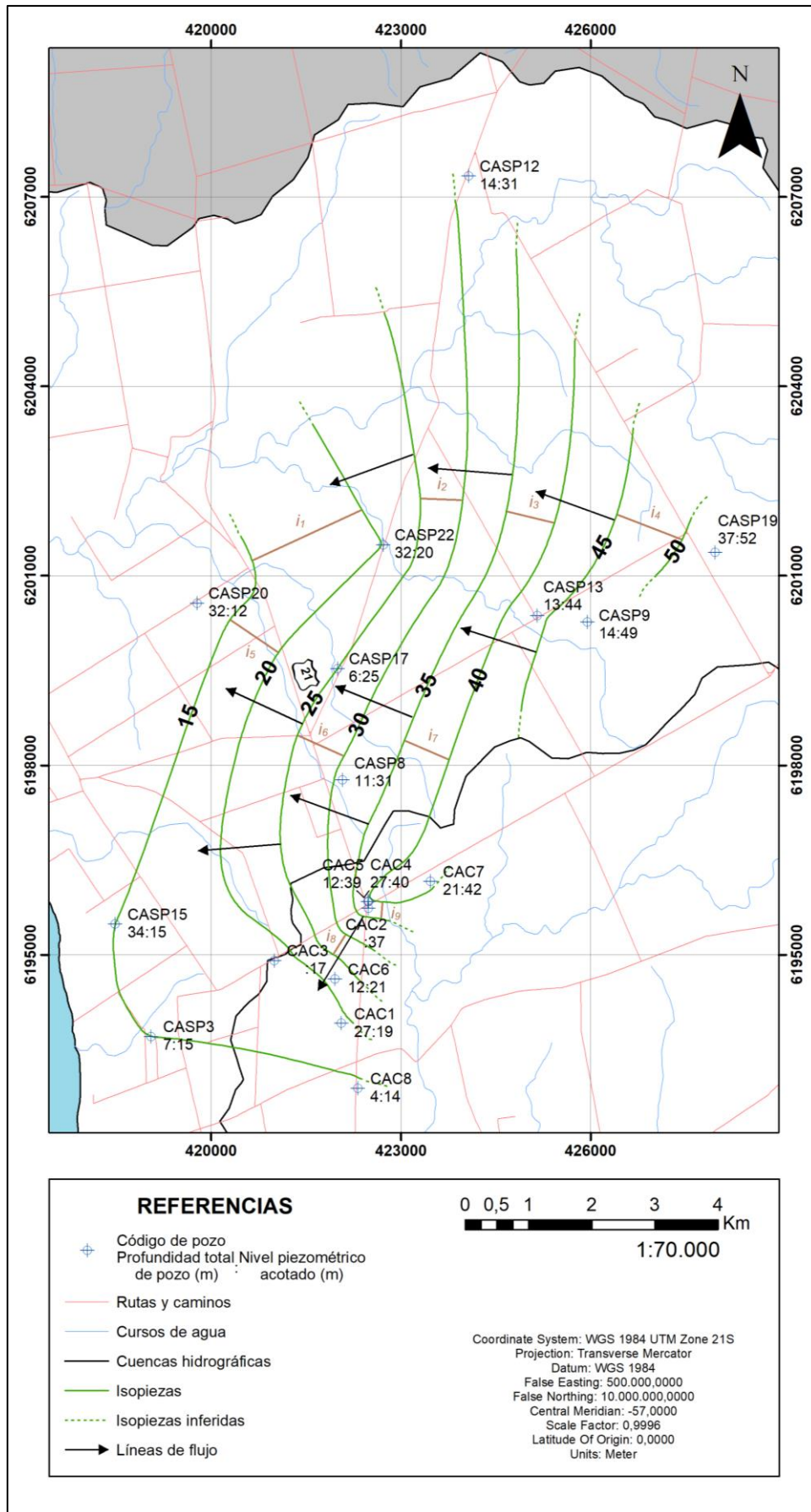


Figura 21. Mapa piezométrico del acuífero sedimentario. San Pedro, Colonia. Mayo 2021.

10.3 Hidrogeoquímica

Para caracterizar la química del agua subterránea se dispuso de 33 muestras, de las cuales 23 corresponden a pozos que captan agua del acuífero sedimentario y 10 del acuífero fracturado. Se efectuaron análisis fisicoquímicos por parte del Laboratorio de Agua y Suelos del Centro Universitario Regional Litoral Norte (CENUR-LN). Se realizaron análisis químicos de dureza total, cationes Sodio (Na⁺), Potasio (K⁺), Magnesio (Mg²⁺), Calcio (Ca²⁺) y aniones Cloruro (Cl⁻), Nitrato (NO₃⁻) y Sulfato (SO₄²⁻). Se detectaron en algunas muestras concentraciones de Fluoruro (F⁻), Nitrito (NO₂⁻), Bromuro (Br⁻), Fosfato (PO₄⁻³), Amonio (NH₄⁺) y Litio (Li⁺). La concentración de bicarbonato se determinó a partir de los datos de alcalinidad obtenidos en el trabajo de campo. Se evaluaron los datos de análisis químico mediante el balance iónico, según la ecuación de cálculo de error (APHA, 1998), la totalidad de las muestras son satisfactorias.

$$Error (\%) = \frac{(\sum cationes - \sum aniones)}{(\sum cationes + \sum aniones)} * 100 \quad APHA (1998)$$

Además, se efectuaron análisis de arsénico total y sus especies por parte del Centro Especializado en Química Toxicológica (CEQUIMTOX) de Facultad de Química. Las especies de arsénico (As⁺³ y As⁺⁵) se presentan en el Anexo IV.

En el campo se midieron in situ los siguientes parámetros fisicoquímicos: conductividad eléctrica, pH, Eh, oxígeno disuelto, sólidos totales disueltos, turbidez y temperatura.

10.3.1 Conceptos teóricos

10.3.1.1 Características fisicoquímicas

Conductividad eléctrica: es la capacidad del agua para conducir la electricidad, su valor crece con la temperatura y es necesario tomar una temperatura de referencia, que suele ser 18 o 25 °C. A su vez, la conductividad crece con el contenido de iones disueltos. La unidad de la conductividad es microsiemens/cm (μS/cm) o microohmios/cm (μmhos/cm) y su valor varía entre 100 y 2000 μS/cm a 18 °C para aguas dulces (Custodio & Llamas, 1983). En Uruguay, el valor máximo permitido de calidad de agua potable para la conductividad eléctrica a 25 °C según la Norma UNIT 833:2008 (Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, 2008) es de 2000 μS/cm.

Turbidez: es la dificultad del agua para transmitir la luz, ocasionada por materias coloidales y partículas en suspensión, tales como arcillas, limo, materia orgánica e inorgánica finamente dividida y microorganismos (Romero Rojas, 2005). Las unidades más empleadas de la turbidez son N.T.U. (*Nephelometric Turbidity Unit*), F.T.U. (*Formazine Turbidity Unit*) y F.N.U. (*Formazin Nephelometric Unit*) (Rigola Lapeña, 1990). En Uruguay, el valor máximo permitido de calidad de agua potable para la turbidez según la Norma UNIT 833:2008 es de 1,0 N.T.U.

Temperatura: las aguas subterráneas tienen una temperatura muy poco variable, y responde a la media anual de las temperaturas atmosféricas del lugar, la temperatura crece 1 °C cada 33 m en media debido al gradiente geotérmico. La temperatura afecta a la viscosidad del agua, capacidad de absorción de gases, etc. La unidad de temperatura es grados centígrados (°C) (Custodio & Llamas, 1983).

pH: es la medida de la concentración de hidrogeniones del agua, el pH crece el 8%/°C al crecer la temperatura, por lo que debe referirse a una cierta temperatura (Custodio & Llamas, 1983). En Uruguay, los valores máximos permitidos de calidad de agua potable para el pH según la Norma UNIT 833:2008 se encuentran en el rango entre 6,5 – 8,5.

Eh: es una medida cuantitativa del potencial de oxidación o reducción de un medio, es de importancia en los procesos de disolución de sales. La unidad de Eh es el milivoltio (mV) (Martínez Alfaro, Martínez Santos & Castaño Castaño, 2006).

Sólidos totales disueltos: es una medida de la concentración de sales disueltas en el agua, sean volátiles o no. La unidad de sólidos totales disueltos es ppm o mg/L (Custodio & Llamas, 1983). En Uruguay, el valor máximo permitido de calidad de agua potable para los sólidos totales disueltos según la Norma UNIT 833:2008 es de 1000 mg/L.

Dureza total: es debida a la presencia de Ca^{2+} y Mg^{2+} disueltos en el agua. Es indicativa del poder incrustante (Rigola Lapeña, 1990). Según la clasificación de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2010), se define como agua “blanda” la que presenta concentraciones inferiores a 60 mg CaCO_3/L , “moderadamente dura” entre 61 y 120 mg/L, “dura” entre 121 y 180 mg/L y “muy dura” aquella con valores superiores a 180 mg/L. En Uruguay, el valor máximo permitido de calidad de agua potable para la dureza total según la Norma UNIT 833:2008 es de 500 mg/L.

10.3.1.2 Iones mayoritarios, minoritarios y elementos traza

Los constituyentes mayoritarios de las aguas subterráneas son los cationes Sodio (Na^+), Potasio (K^+), Magnesio (Mg^{2+}), Calcio (Ca^{2+}) y los aniones Cloruro (Cl^-), Nitrato (NO_3^-), Bicarbonato (HCO_3^-) y Sulfato (SO_4^{2-}) (Custodio & Llamas, 1983).

Los constituyentes minoritarios son aquellos que se encuentran habitualmente formando menos del 1% del contenido iónico total, algunos de ellos son el Boro (B^{+3}), Bromuro (Br^-), Fluoruro (F^-), Hierro (Fe^{+2}), Ioduro (I^-), Litio (Li^+), Manganeseo (Mn), Amonio (NH_4^+), Nitrito (NO_2^-), Fósforo (P), Fosfato (PO_4^{-3}), Sílice (Si), Sulfuro (S^{2-}), Estroncio (Sr^{2+}), etc (Custodio & Llamas, 1983).

Los elementos traza son aquellos que se presentan en muy bajas concentraciones, no suelen determinarse en análisis habituales, aunque tienen interés en ciertas investigaciones del efecto de las sustancias disueltas en el agua sobre la salud humana. Los iones metálicos derivados del Arsénico (As), Antimonio (Sb), Cromo (Cr), Plomo (Pb),

Cobre (Cu), Zinc (Zn), Bario (Ba), Vanadio (V), Mercurio (Hg), Uranio (U), etc., a veces están en cantidades medibles, pero en general son elementos traza (Custodio & Llamas, 1983).

La concentración iónica que se incorpora al agua no sólo depende de la composición de las rocas, también influyen las condiciones climáticas, la permeabilidad de los materiales o las actividades antrópicas (Custodio & Llamas, 1983).

Los estándares para la calidad del agua potable dependen de cada país ya que pueden tener diversas razones para especificar un valor estricto en función de una estrategia general de riesgo-beneficio para proteger la salud pública (OMS, 2021). A continuación se presentan los valores máximos permitidos según la Norma UNIT 833:2008 y los valores sugeridos de la OMS (2021).

Tabla 6. Valores de calidad de agua potable según Norma UNIT 833:2008 y OMS (2021).

Elementos	Valor máximo permitido (mg/L) Norma UNIT 833:2008	Valor sugerido (mg/L) OMS (2021)
Cloruro	250	250
Nitrato	50	50
Bicarbonato	-	-
Sulfato	400	250
Sodio	200	200
Potasio	-	12
Magnesio	-	70
Calcio	-	150
Arsénico	0,02	0,01

10.3.1.3 Representación gráfica

Los datos de análisis químicos se representan mediante diferentes gráficas y diagramas para clasificar el tipo de agua y analizar las relaciones entre los iones de una misma muestra. A continuación se describen los diagramas de Piper, Stiff, Schöeller – Berkaloff y RAS.

Diagrama de Piper

El diagrama de Piper está formado por dos triángulos equiláteros, donde cada uno representa la proporción de tres componentes y la suma debe representar el 100%. Se utiliza un triángulo para los cationes principales Ca^{2+} , Mg^{2+} y $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ y otro para los aniones principales $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$, Cl^- y SO_4^{2-} . La proporción de los iones se expresa en porcentaje de meq/L. Además, se incluye un rombo que recoge la información de ambos triángulos, donde las aguas geoquímicamente similares quedan agrupadas en áreas bien definidas (Custodio & Llamas, 1983).

Diagrama de Stiff

Es un diagrama que consiste en tres rectas paralelas igualmente espaciadas cortadas por una normal, dando tres semirrectas izquierdas y tres semirrectas derechas. Las primeras representan el campo de cationes en el cual se representa de arriba a abajo $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, Ca^{2+} y Mg^{2+} y las segundas representan el campo de aniones donde se representa de arriba a abajo Cl^- , $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ y SO_4^{2-} . Sobre cada recta se toma un segmento proporcional a los meq/L del ion correspondiente y se unen los extremos generando un polígono representativo (Custodio & Llamas, 1983).

Diagrama de Schöeller – Berkloff

Se emplea una escala logarítmica para representar concentraciones en meq/L de aniones, cationes o una suma de ellos y se unen los puntos mediante una secuencia de líneas. La inclinación de la recta que une los puntos representativos de dos iones mide su relación (Custodio & Llamas, 1983).

Diagrama de clasificación de agua destinada al riego

Se utiliza el diagrama propuesto por el U. S. Laboratory Staff (1954), que se basa en la medida de la conductividad eléctrica del agua en mmhos/cm para determinar el riesgo de salinización del suelo y en el cálculo del índice RAS (Relación de Adsorción de Sodio, o SAR por sus siglas en inglés) para determinar el riesgo de sodificación o alcalinización. El índice RAS se basa en una fórmula (Suárez, 1981) que relaciona la concentración relativa de Na^+ con respecto al Ca^{2+} y Mg^{2+} . Las tres concentraciones se expresan en meq/L (Olías, Cerón & Fernández, 2005).

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}} \quad \text{Suárez (1981)}$$

Se definen cuatro clases de riesgo de salinización (conductividad eléctrica desde C1, bajo; a C4, muy alto) y otras cuatro de riesgo de sodificación (contenido en sodio desde S1, bajo; a S4, muy alto), resultando en total 16 clases de agua (Olías, Cerón & Fernández, 2005).

Tabla 7. Clases de agua correspondiente al Diagrama RAS.

C1	Agua de baja salinidad, apta para el riego en todos los casos. Pueden existir problemas sólo en suelos de muy baja permeabilidad.
C2	Agua de salinidad media, apta para el riego. En ciertos casos puede ser necesario emplear volúmenes de agua en exceso y utilizar cultivos tolerantes a la salinidad.
C3	Agua de salinidad alta que puede utilizarse para el riego de suelos con buen drenaje, empleando volúmenes de agua en exceso para lavar el suelo y utilizando cultivos muy tolerantes a la salinidad.
C4	Agua de salinidad muy alta que en muchos casos no es apta para el riego. Sólo debe usarse en suelos muy permeables y con buen drenaje, empleando volúmenes en exceso para lavar las sales del suelo y utilizando cultivos muy tolerantes a la salinidad.
S1	Agua con bajo contenido en sodio, apta para el riego en la mayoría de los casos. Sin embargo, pueden presentarse problemas con cultivos muy sensibles al sodio.
S2	Agua con contenido medio en sodio, y por lo tanto, con cierto peligro de acumulación de sodio en el suelo, especialmente en suelos de textura fina y de baja permeabilidad. Deben vigilarse las condiciones físicas del suelo y especialmente el nivel de sodio cambiante del suelo, corrigiendo en caso necesario.
S3	Agua con contenido alto en sodio y gran peligro de acumulación de sodio en el suelo. Son aconsejables aportaciones de materia orgánica y empleo de yeso para corregir el posible exceso de sodio en el suelo. También se requiere un buen drenaje y el empleo de volúmenes copiosos de riego.
S4	Agua con contenido muy alto en sodio. No es aconsejable para el riego en general, excepto en caso de baja salinidad y tomando todas las precauciones apuntadas.

10.3.2 Acuífero fracturado

10.3.2.1 Características fisicoquímicas

De acuerdo al análisis de los datos de los parámetros fisicoquímicos medidos, surge que el agua subterránea presenta valores por debajo de la norma actual de agua potable Norma UNIT 833:2008, a excepción de dos muestras que presentan valores de turbidez (pozos *CASP27* y *CAC9*) que superan el valor máximo permitido según la Norma UNIT 833:2008. A continuación se detallan los datos de los parámetros fisicoquímicos medidos.

Conductividad eléctrica: se observa que los valores más altos se localizan en los sectores Sur y Oeste-suroeste, probablemente asociados a sedimentos de la Formación Camacho, mientras que los valores más bajos generalmente se ubican en los sectores centro-Norte y Este. No se percibe una relación entre la dirección de flujo de agua subterránea y los valores de conductividad eléctrica. Del análisis de los datos surge un valor medio de 936 $\mu\text{S}/\text{cm}$, un valor máximo de 1365 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el pozo *CASP27* y un valor mínimo de 691 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el pozo *CASP14*. La totalidad de las muestras se encuentran por debajo del valor máximo permitido de calidad de agua potable según la Norma UNIT 833:2008 (Fig. 22).

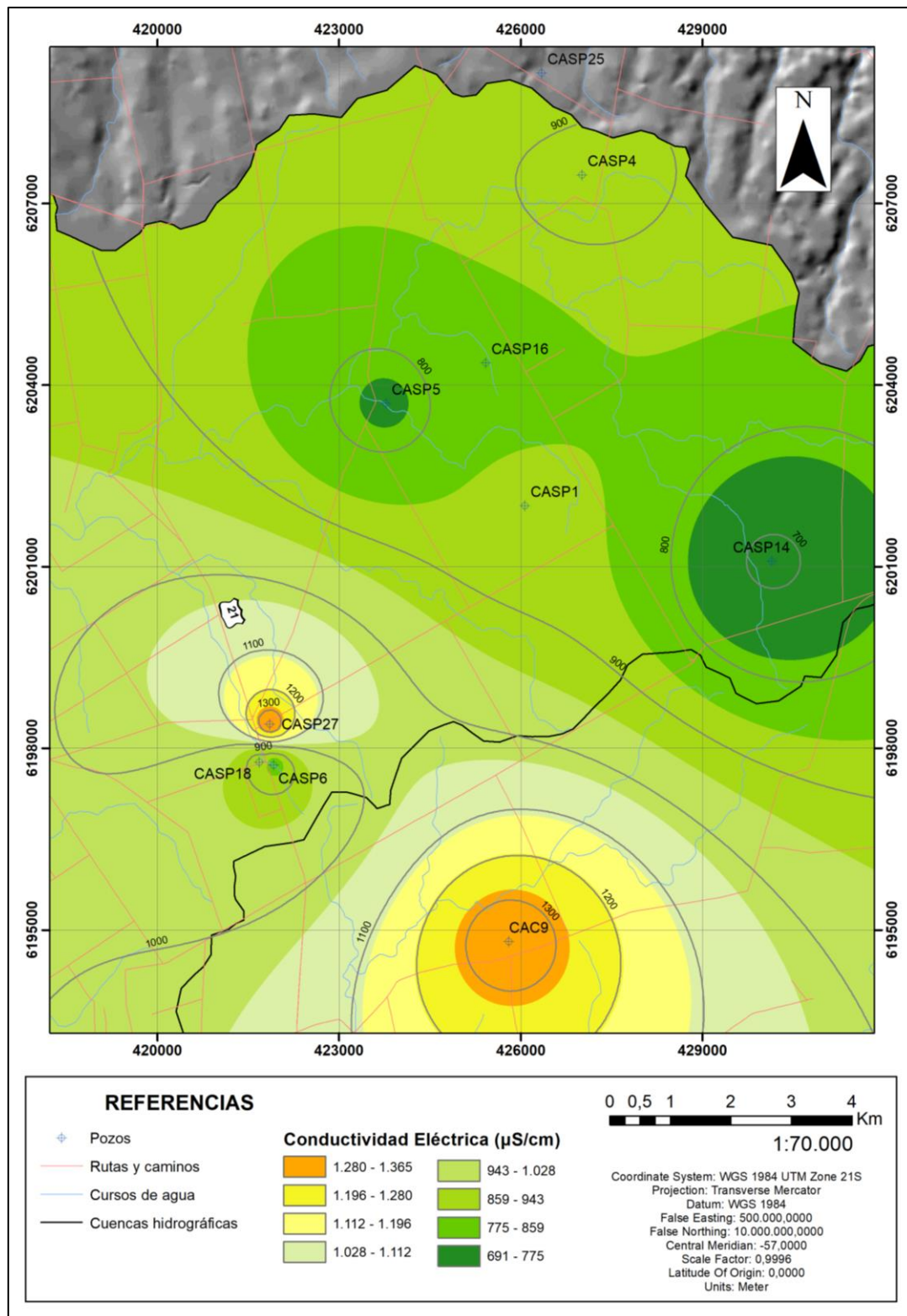


Figura 22. Mapa de conductividad eléctrica ($\mu\text{S/cm}$) en agua subterránea (San Pedro, Colonia) correspondiente al acuífero fracturado.

pH: los valores más altos generalmente se encuentran en la mitad oriental y están relacionados a zonas topográficas más altas, mientras que los valores más bajos se ubican en la mitad occidental. Se observa una tendencia de aumento de pH cuando aumenta la concentración de nitratos y una disminución de pH con la dirección de flujo de agua subterránea. En cuanto a los valores de pH obtenidos en campo, se registra un valor

medio de 7,2, un valor máximo de 7,4 en el pozo CASP4 y un valor mínimo de 6,91 en el pozo CASP5. Todas las muestras se encuentran en el rango de calidad de agua potable según la Norma UNIT 833:2008 (Fig. 23).

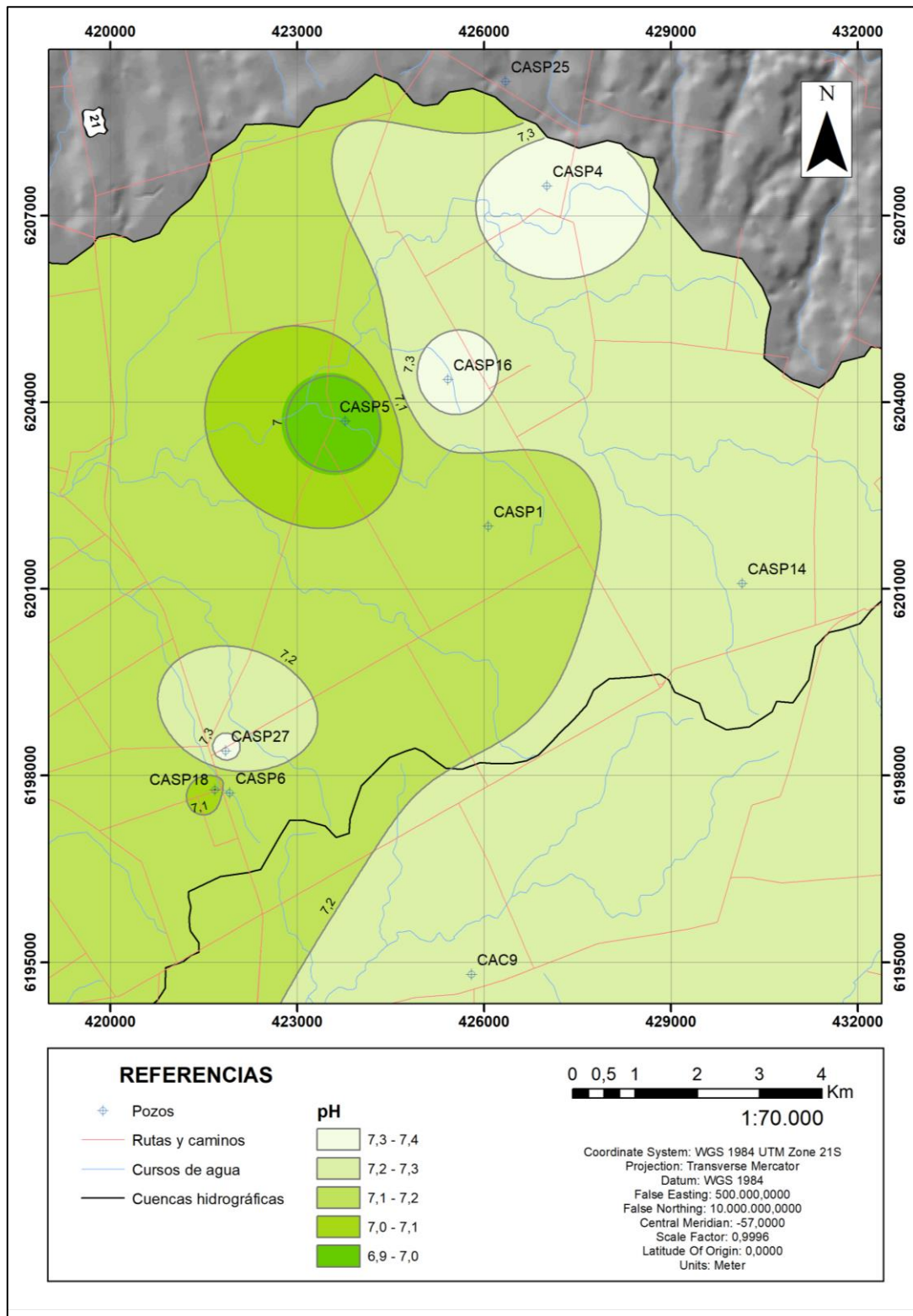


Figura 23. Mapa de pH en agua subterránea (San Pedro, Colonia) correspondiente al acuífero fracturado.

Eh: los mayores valores se localizan en los sectores centro-Norte y Este, mientras que los menores valores se ubican en los sectores Sur y Oeste-suroeste. No se percibe una relación entre la dirección de flujo de agua subterránea y los valores de Eh. Presenta un valor medio de 191,92 mV, un valor máximo de 224,6 mV en el pozo *CASP14* y un valor mínimo de 140,3 mV en el pozo *CASP27*.

Oxígeno disuelto: los valores más altos se encuentran en los sectores centro-Norte y Este, mientras que los valores más bajos se sitúan en los sectores Sur y Suroeste. Se observa una disminución de oxígeno disuelto con la dirección de flujo de agua subterránea. Muestra un valor medio de 4,2 ppm, un valor máximo de 6,5 ppm en el pozo *CASP25* y un valor mínimo de 2,71 ppm en el pozo *CASP27*.

Sólidos totales disueltos: se observa que los mayores valores se distribuyen al Sur y Oeste-suroeste, mientras que los menores valores generalmente se registran al centro-Norte y Este, confirmando el principio de la relación entre la conductividad eléctrica y los sólidos totales disueltos. No se percibe una relación entre la dirección de flujo de agua subterránea y los valores de sólidos totales disueltos. Los sólidos totales disueltos presentan un valor medio de 468,5 ppm, un valor máximo de 685 ppm en el pozo *CASP27* y un valor mínimo de 346 ppm en el pozo *CASP14*. La totalidad de las muestras se encuentran por debajo del valor máximo permitido de calidad de agua potable según la Norma UNIT 833:2008 (Fig. 24).

Turbidez: los valores más elevados se localizan en los sectores Sur y Oeste-suroeste, mientras que los valores más bajos generalmente se ubican en los sectores centro-Norte y Este. No se observa una relación entre la dirección de flujo de agua subterránea y los valores de turbidez. Presenta un valor medio de 0,27 FNU, para el cálculo se descartan los valores máximos de 1,4 y 1,6 FNU correspondientes a los pozos *CASP27* y *CAC9*, respectivamente. Excluyendo dichos valores, el valor máximo es de 1 FNU en el pozo *CASP6* y el valor mínimo es de 0 FNU en los pozos *CASP16* y *CASP18*. Excepto los pozos *CASP27* y *CAC9*, las muestras se encuentran por debajo del valor máximo permitido de calidad de agua potable según la Norma UNIT 833:2008.

Temperatura: los valores más altos se observan en los sectores centro-Oeste y Suroeste, mientras que los valores más bajos generalmente se observan en los sectores Norte-noreste y Sur. No se percibe una relación entre la dirección de flujo de agua subterránea y los valores de temperatura. La temperatura media del agua subterránea es de 17,02 °C, el valor máximo es de 19,03 °C en el pozo *CASP5* y el valor mínimo es de 14,18 °C en el pozo *CAC9*. La totalidad de las muestras son consistentes con el rango de temperaturas normales del agua subterránea.

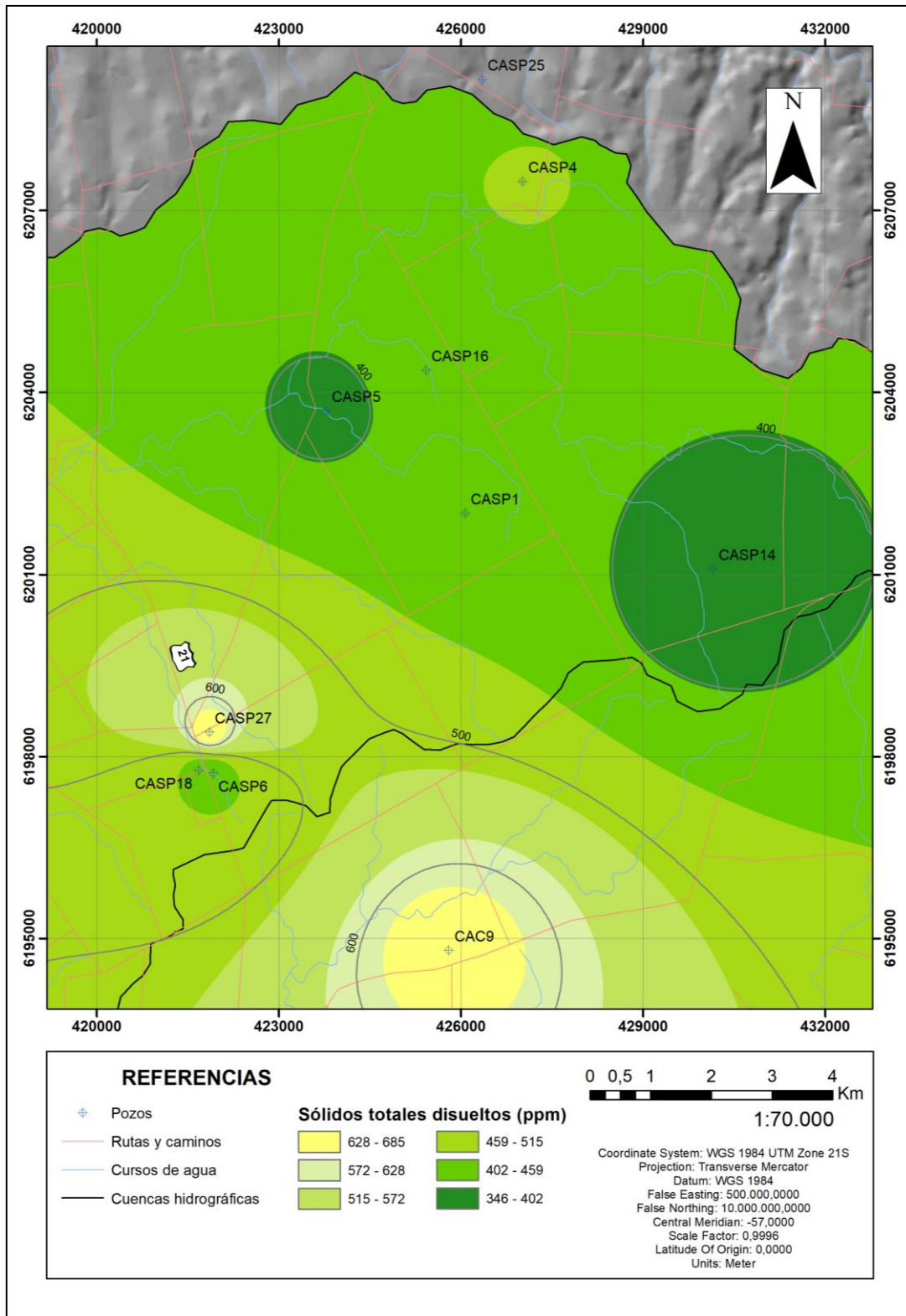


Figura 24. Mapa de sólidos totales disueltos (ppm) en agua subterránea (San Pedro, Colonia) correspondiente al acuífero fracturado.

Dureza total: los mayores valores generalmente se encuentran en los sectores centro-Sur y Norte, mientras que los menores valores se ubican en el sector Norte-noreste. No se observa una relación entre la dirección de flujo de agua subterránea y los valores de dureza total. Muestra un valor medio de 272,72 mg CaCO₃/L, un valor máximo de 346,8 mg CaCO₃/L en el pozo *CASP25* y un valor mínimo de 153,5 mg CaCO₃/L en el pozo *CASP4*. Según el valor medio de dureza total se la clasifica como agua muy dura. La totalidad de las muestras se encuentran por debajo del valor máximo permitido de calidad de agua potable según la Norma UNIT 833:2008.

10.3.2.2 Iones mayoritarios y elemento traza (arsénico total)

En función del análisis de los resultados de los análisis químicos, surge que el agua subterránea presenta valores por debajo de la norma actual de agua potable Norma UNIT 833:2008, a excepción de una muestra que presenta concentración de nitratos (pozo *CASP25*) y concentración de arsénico total (pozo *CASP4*) que superan el valor máximo permitido según la Norma UNIT 833:2008. Para este último sólo una muestra (pozo *CASP5*) se encuentra por debajo del valor sugerido según la OMS (2021). A continuación se detallan los iones mayoritarios y arsénico total. Los datos de los resultados de los análisis químicos se presentan en el Anexo IV.

Aniones

Cloruros (Cl⁻): la concentración más anómala se observa en el sector Sur, mientras que la concentración más baja se observa en el sector Suroeste. No se percibe una relación entre la dirección de flujo de agua subterránea y la concentración de cloruros. Del análisis de los datos surge que la concentración media de este elemento es de 26,81 mg/L, con un valor máximo de 122,36 mg/L en el pozo *CAC9* y un valor mínimo de 3,04 mg/L en el pozo *CASP27*. Todas las muestras se encuentran por debajo del valor máximo permitido de calidad de agua potable según la Norma UNIT 833:2008.

Nitratos (NO₃⁻): se observa que las concentraciones más altas se distribuyen al Norte, mientras que las concentraciones más bajas se registran en los sectores Sur y Este, probablemente asociadas a condiciones de acuífero confinado. No se observa una relación entre la dirección de flujo de agua subterránea y la concentración de nitratos. La concentración media para nitratos es de 19,27 mg/L, para el cálculo se descarta el valor máximo de 56,64 mg/L que corresponde al pozo *CASP25*. Excluyendo dicho valor, el valor máximo es de 44,54 mg/L en el pozo *CASP4* y el valor mínimo es de 0,08 mg/L en el pozo *CASP14*. Excepto el pozo *CASP25*, las muestras se encuentran por debajo del valor máximo permitido de calidad de agua potable según la Norma UNIT 833:2008 (Fig. 25).

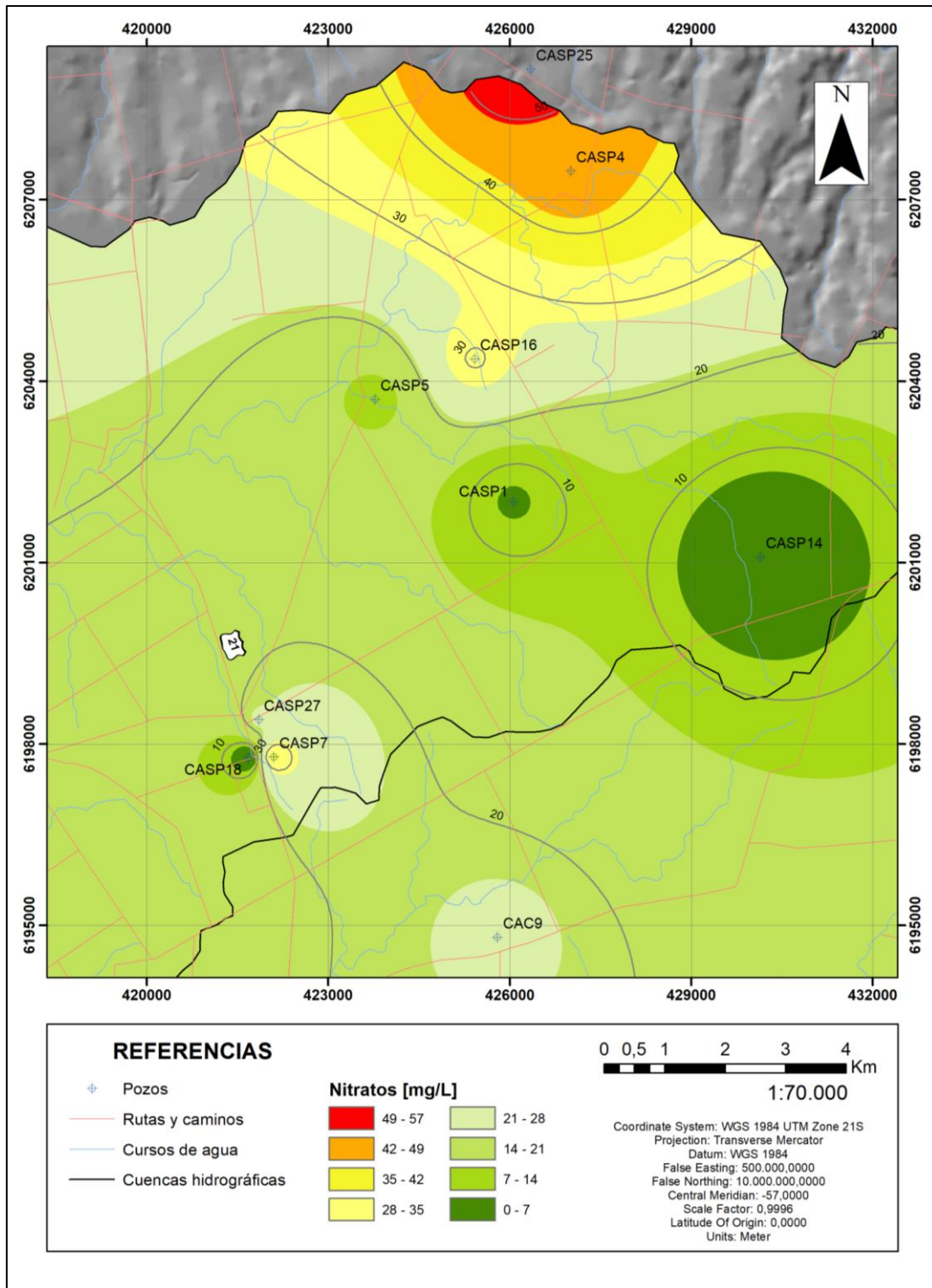


Figura 25. Mapa de concentración de nitratos [mg/L] en agua subterránea (San Pedro, Colonia) correspondiente al acuífero fracturado.

Bicarbonato (HCO_3^-): las mayores concentraciones se observan en la mitad oriental, mientras que las menores concentraciones se observan en la mitad occidental. Se distingue una disminución de la concentración de bicarbonato con la dirección de flujo de agua subterránea. A partir de los resultados de alcalinidad, la concentración media de bicarbonato es de 486,66 mg/L, con un valor máximo de 545,34 mg/L en el pozo *CASP14* y un valor mínimo de 314,76 mg/L en el pozo *CASP27*. Para este elemento la Norma UNIT 833:2008 no establece un valor máximo permitido de calidad de agua potable.

Sulfatos (SO_4^{2-}): la concentración más alta se observa en el sector Norte-noreste, mientras que la concentración más baja se registra en el sector Suroeste. No se observa una relación entre la dirección de flujo de agua subterránea y la concentración de sulfatos. La concentración media de este elemento es de 13,11 mg/L, el valor máximo es de 23,19 mg/L en el pozo *CASP4* y el valor mínimo es de 4,55 mg/L en el pozo *CASP27*. Todas las muestras se encuentran por debajo del valor máximo permitido de calidad de agua potable según la Norma UNIT 833:2008.

Arsénico total (As): la alta concentración de arsénico total generalmente tiene un origen vinculado a procesos naturales, así como procesos antropogénicos. Se observa una tendencia de aumento de la concentración de arsénico total cuando aumenta la concentración de nitratos, posiblemente debido a la actividad agropecuaria. La concentración de arsénico total más anómala se registra en el sector Norte-noreste, mientras que la menor concentración se observa en el sector centro-Oeste. No se observa una relación entre la dirección de flujo de agua subterránea y la concentración de arsénico total. Del análisis de los datos surge que la concentración media es de 0,017 mg/L, con un valor máximo de 0,034 mg/L en el pozo *CASP4* y un valor mínimo de 0,009 mg/L en el pozo *CASP5*. Únicamente una muestra correspondiente al pozo *CASP4* supera el valor máximo permitido según la Norma UNIT 833:2008 (Fig. 26) y sólo una muestra correspondiente al pozo *CASP5* se encuentra por debajo del valor sugerido según la OMS (2021) (Fig. 27).

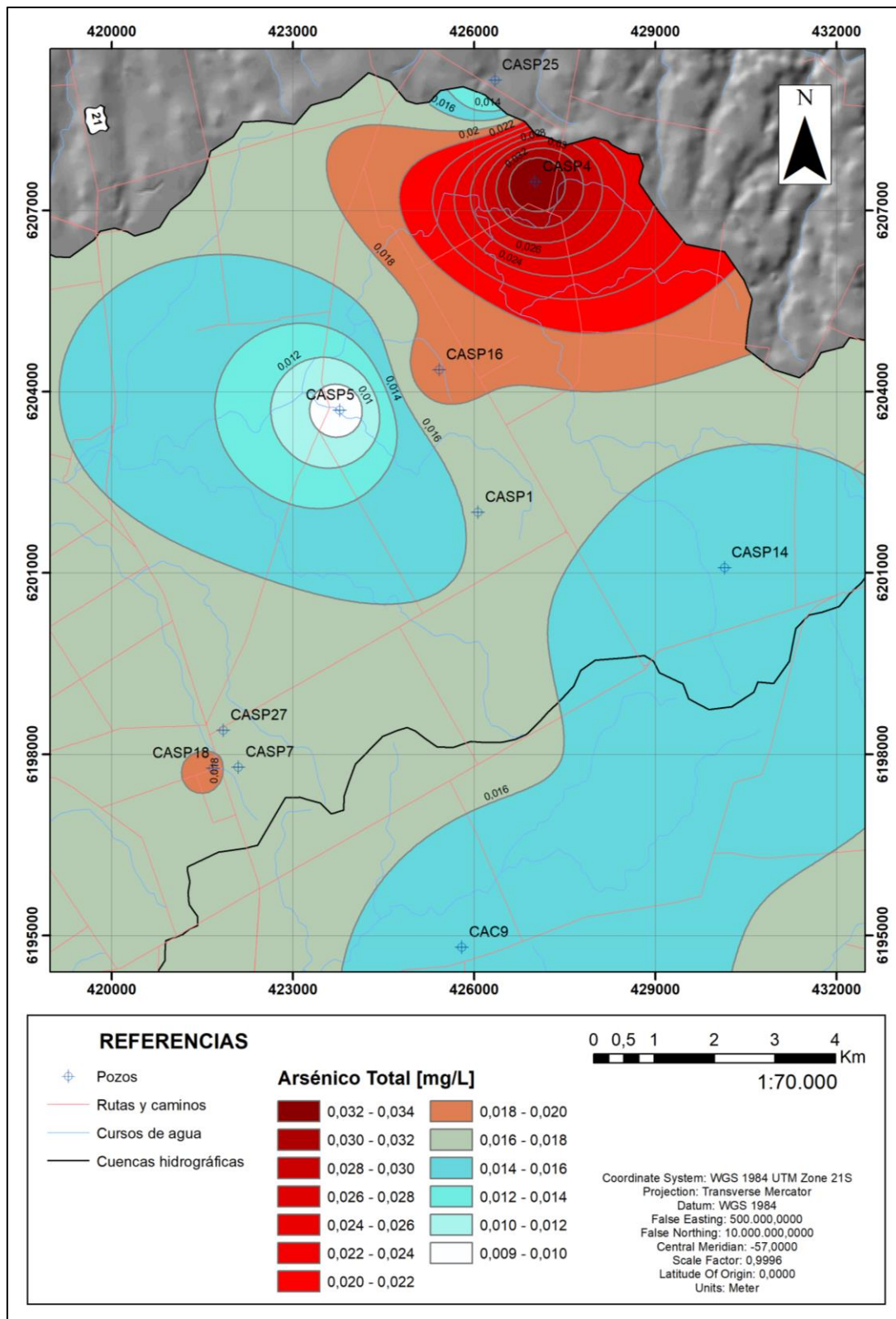


Figura 26. Mapa de concentración de arsénico total [mg/L] en agua subterránea (San Pedro, Colonia) según Norma UNIT 833:2008 correspondiente al acuífero fracturado.

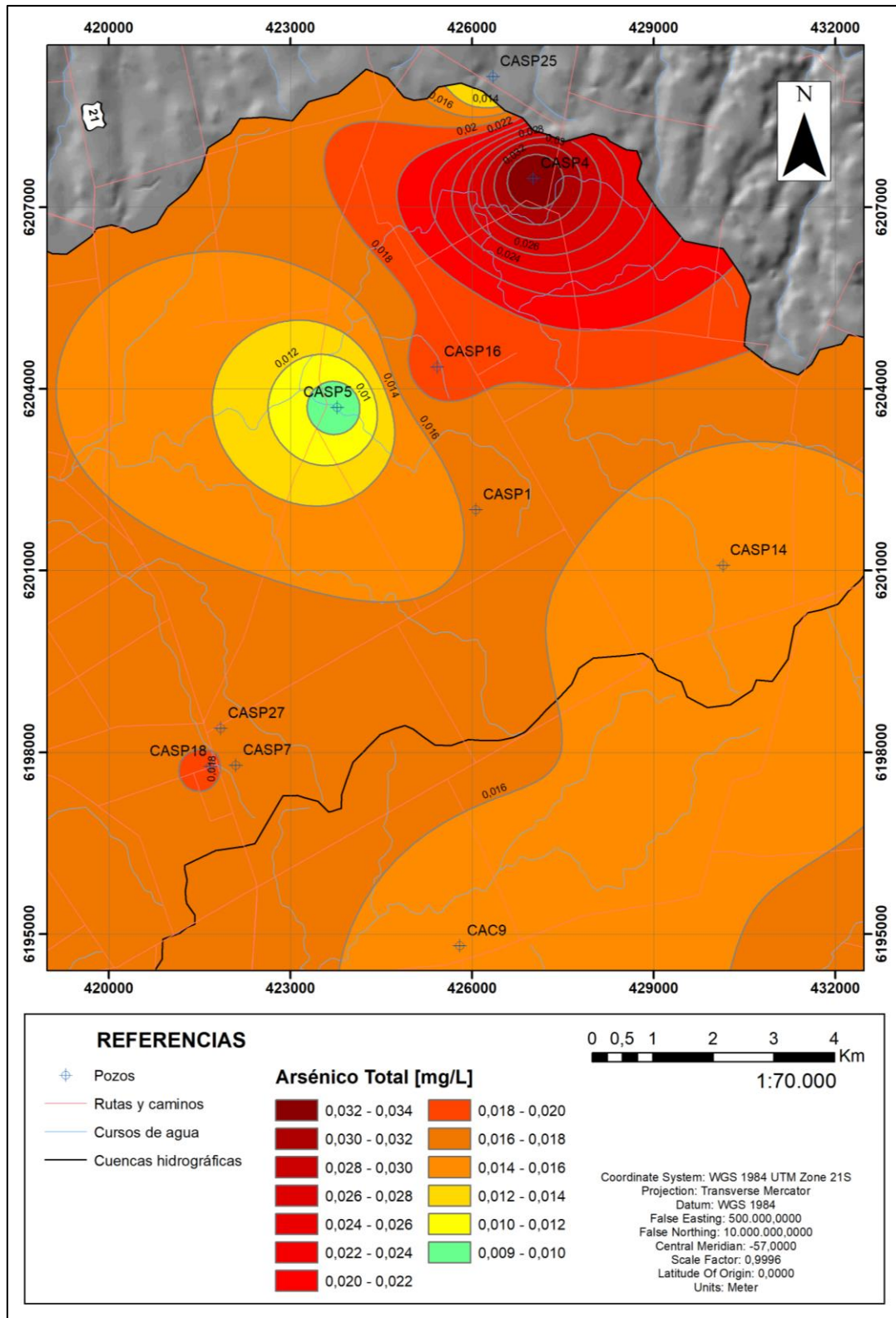


Figura 27. Mapa de concentración de arsénico total [mg/L] en agua subterránea (San Pedro, Colonia) según Norma OMS (2021) correspondiente al acuífero fracturado.

Cationes:

Sodio (Na^+): las concentraciones más elevadas se observan en los sectores Norte-noreste y Sur, mientras que las concentraciones más bajas se registran en los sectores centro-Oeste y Suroeste. Se distingue una disminución de la concentración de sodio con la dirección de flujo de agua subterránea. Con respecto a la concentración media de sodio surge un valor de 33,19 mg/L. El valor máximo es de 87,53 mg/L en el pozo *CAC9* y el valor mínimo es de 3,57 mg/L en el pozo *CASP27*. Todas las muestras se encuentran por debajo del valor máximo permitido de calidad de agua potable según la Norma UNIT 833:2008.

Potasio (K^+): las concentraciones más anómalas se observan en los sectores centro-Norte y centro-Oeste, mientras que la menor concentración se observa en el sector Sur. No se percibe una relación entre la dirección de flujo de agua subterránea y la concentración de potasio. El elemento presenta una concentración media de 3,87 mg/L, con un valor máximo de 13,02 mg/L en el pozo *CASP5* y un valor mínimo de 0,29 mg/L en el pozo *CAC9*. Para este elemento la Norma UNIT 833:2008 no establece un valor máximo permitido de calidad de agua potable.

Magnesio (Mg^{2+}): las mayores concentraciones se observan en los sectores centro-Norte y centro-Oeste, mientras que las menores concentraciones se registran en los sectores Sur y Suroeste. No se observa una relación entre la dirección de flujo de agua subterránea y la concentración de magnesio. La concentración media de este elemento es de 5,17 mg/L, con un valor máximo de 9,46 mg/L en el pozo *CASP5* y un valor mínimo de 0,53 mg/L en el pozo *CAC9*. Para este elemento la Norma UNIT 833:2008 no establece un valor máximo permitido de calidad de agua potable.

Calcio (Ca^{2+}): las concentraciones más elevadas se observan en los sectores Suroeste y Norte, mientras que las menores concentraciones se observan en los sectores centro-Norte y Norte-noreste. No se percibe una relación entre la dirección de flujo de agua subterránea y la concentración de calcio. Con respecto a la concentración media de calcio surge un valor de 19,35 mg/L. El valor máximo es de 80,47 mg/L en el pozo *CASP7* y el valor mínimo es de 1,61 mg/L en el pozo *CASP16*. Para este elemento la Norma UNIT 833:2008 no establece un valor máximo permitido de calidad de agua potable.

El análisis de los datos se realizó a partir de la elaboración de los diagramas de Piper, Stiff, Schöeller – Berkloff y clasificación de agua destinada al riego (RAS).

A partir del análisis del diagrama de Piper realizado seis muestras se clasifican como aguas bicarbonatadas sódicas, tres como aguas bicarbonatadas cálcicas y una del tipo bicarbonatada magnésica (Fig. 28). El predominio del ion sodio es producto de procesos de intercambio catiónico en la evolución normal de las aguas subterráneas. Respecto a la variación aniónica, se presenta un aumento del ion bicarbonato, mientras se registra en una muestra un aumento del ion cloruro en relación con las restantes.

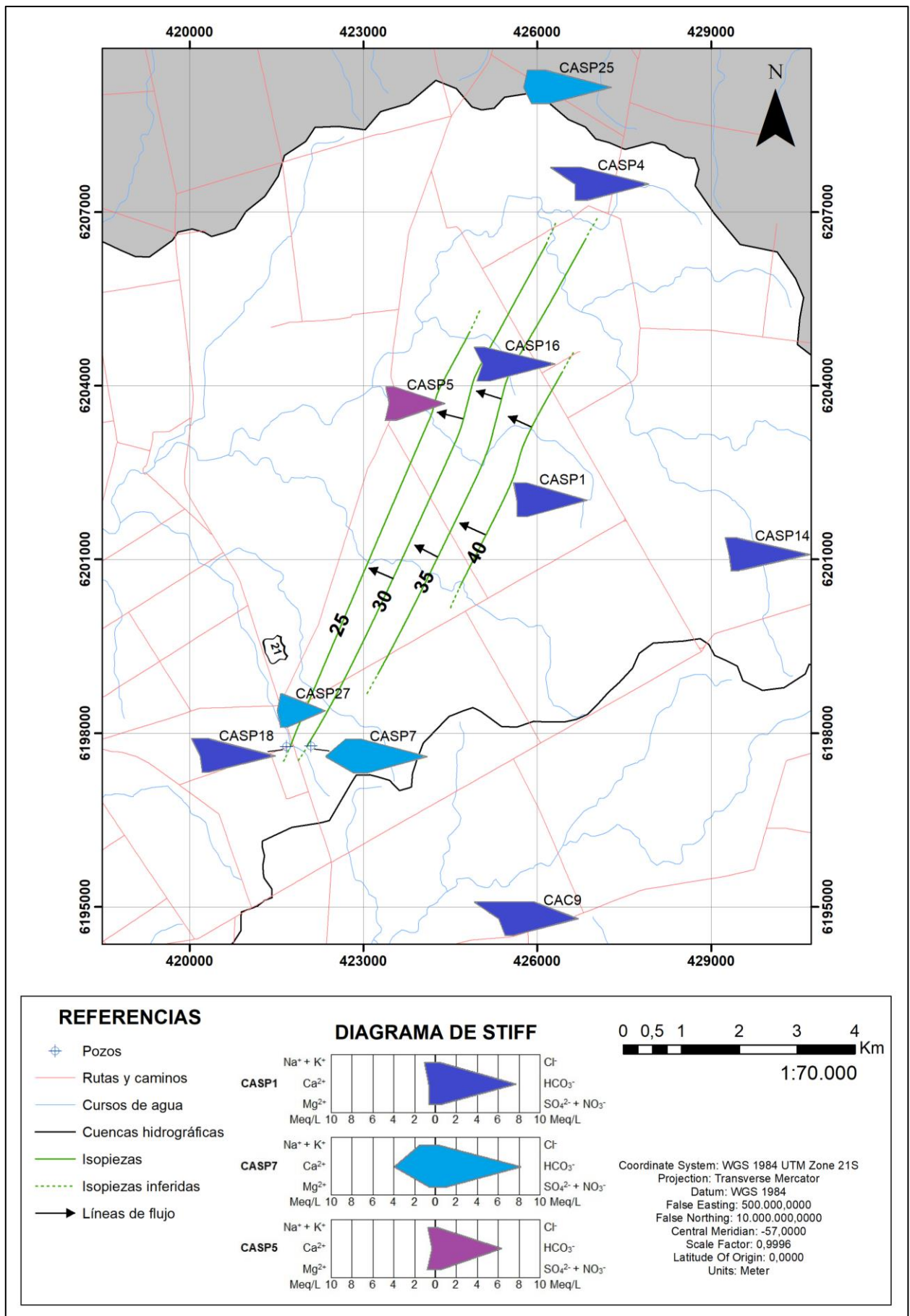


Figura 29. Mapa hidroquímico según Stiff (San Pedro, Colonia) correspondiente al acuífero fracturado.

Del análisis del diagrama de Schöeller – Berkaloff se observa que los iones predominantes son el sodio entre los cationes, indicando aguas de larga residencia y bicarbonato entre los aniones (Fig. 30). El diagrama permite visualizar la composición química entre las muestras analizadas, respecto a los iones restantes, se observan concentraciones más altas de calcio, a excepción de los pozos *CASP5* y *CASP16* que presentan concentraciones más elevadas de magnesio. Se observan concentraciones más altas de cloruro, a excepción de los pozos *CASP14*, *CASP16* y *CASP27* que presentan concentraciones más elevadas de sulfato.

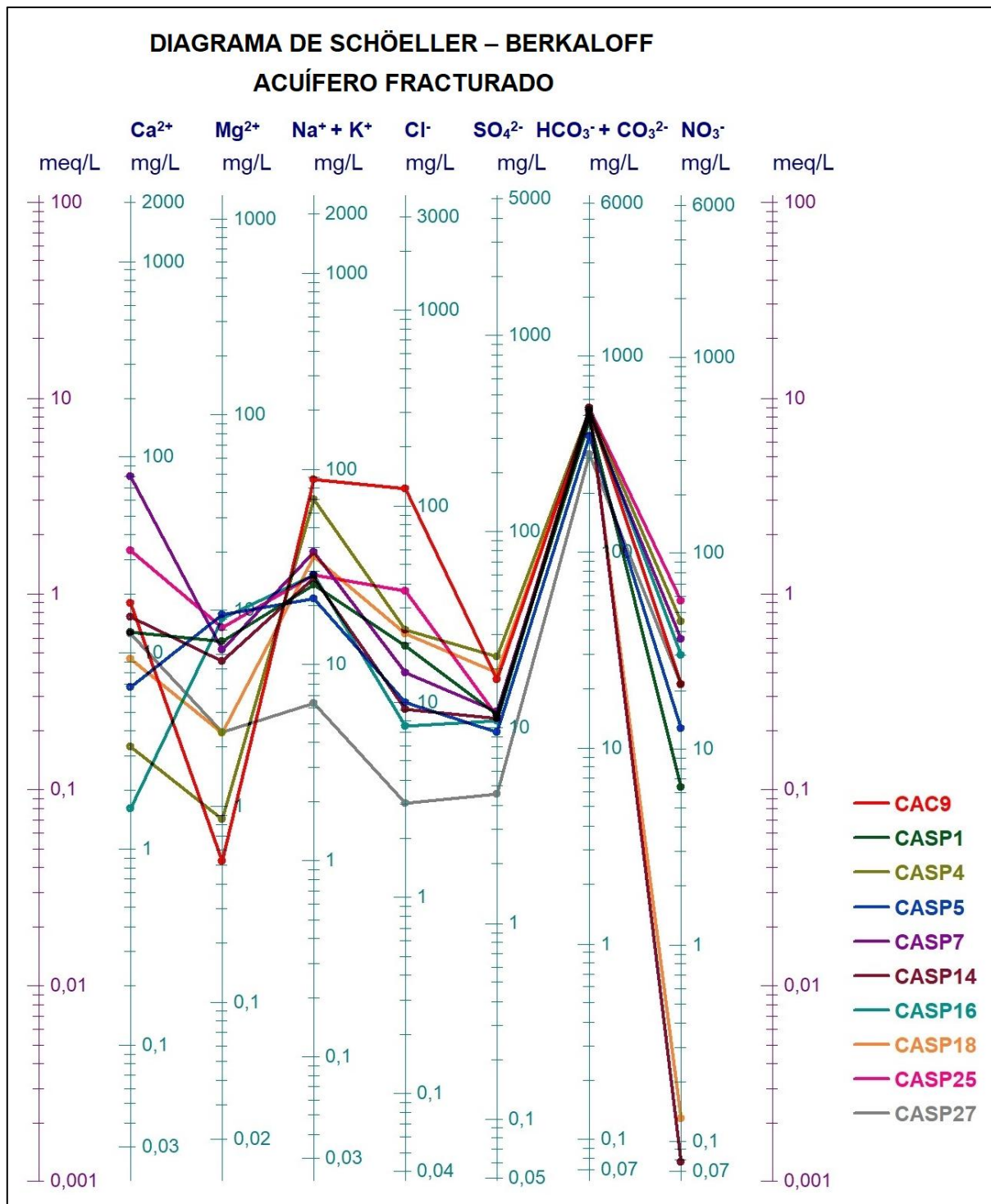


Figura 30. Diagrama de Schöeller – Berkaloff correspondiente al acuífero fracturado.

A partir del diagrama RAS se observa que la mayoría de las muestras de agua del acuífero fracturado se clasifican como C3-S1, siendo de alta salinidad y bajo contenido en sodio, utilizándose el agua para riego en suelos con buen drenaje y en cultivos que sean muy tolerantes a la salinidad (Fig. 31).

La muestra de agua que se clasifica como C2-S1 es semejante al predominante, mientras que las muestras de agua restantes se clasifican como C3-S2, indicando aguas de alta salinidad y medio contenido en sodio. Puede existir cierto peligro de acumulación de sodio en el suelo, especialmente los arcillosos y franco-arcillosos y de baja permeabilidad. Además, se debe controlar las condiciones físicas del suelo y el nivel de sodio cambiante del suelo, aplicando técnicas correctoras necesarias.

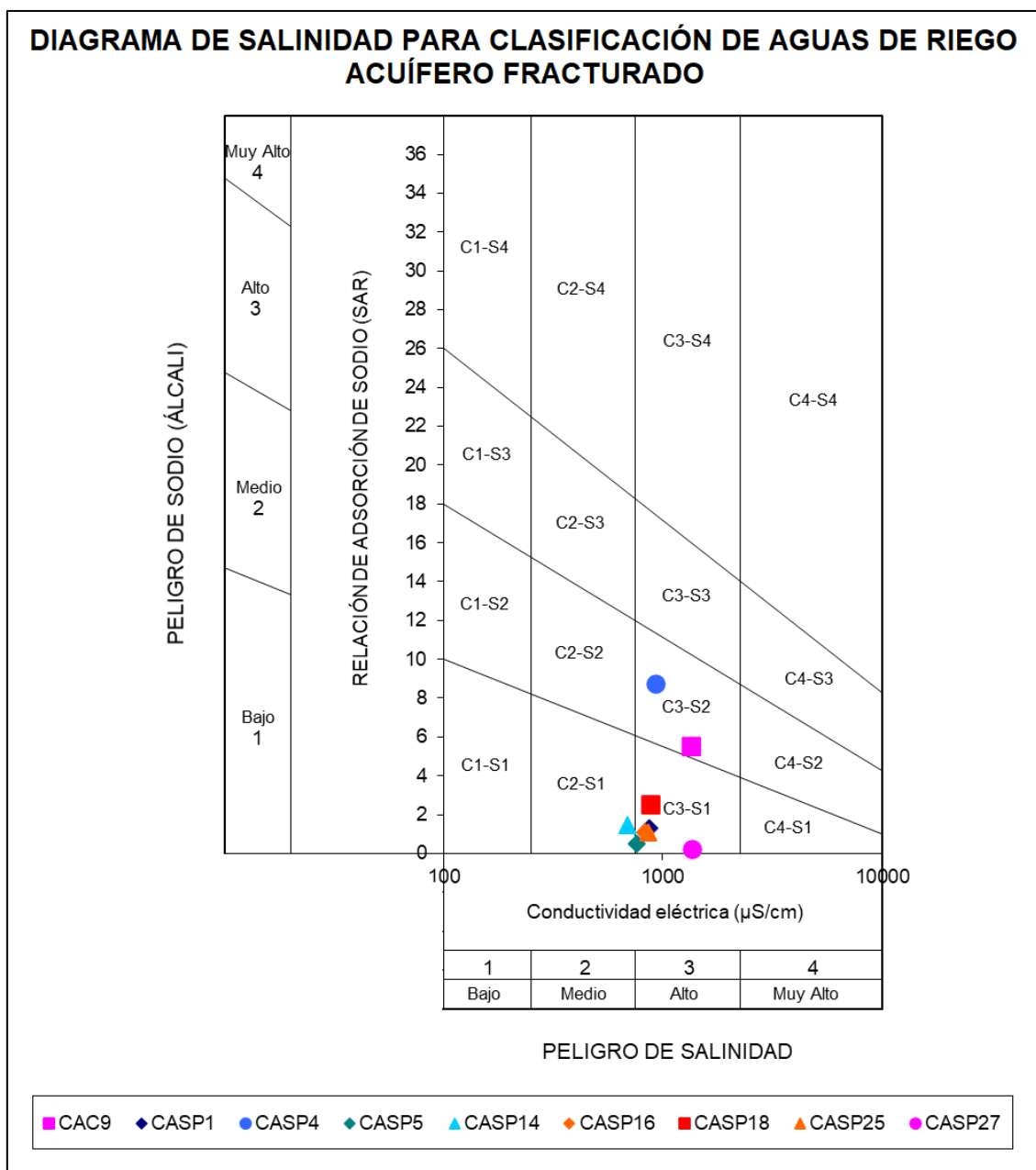


Figura 31. Diagrama de clasificación de agua destinada al riego (RAS) correspondiente al acuífero fracturado.

10.3.3 Acuífero sedimentario

10.3.3.1 Características fisicoquímicas

De acuerdo al análisis de los datos de los parámetros fisicoquímicos medidos, surge que el agua subterránea presenta valores por debajo de la norma actual de agua potable Norma UNIT 833:2008, a excepción de dos muestras que presentan valores de turbidez (pozos *CASP13* y *CAC2*) y una muestra que presentan valor de conductividad eléctrica (pozo *CASP9*), sólidos totales disueltos (pozo *CASP9*) y dureza total (pozo *CAC6*) que superan el valor máximo permitido según la Norma UNIT 833:2008. A continuación se detallan los datos de los parámetros fisicoquímicos medidos.

Conductividad eléctrica: se observa que los valores más altos se localizan en los sectores Este y centro-Sur, mientras que los valores más bajos se ubican en los sectores centro-Oeste y Sur. Se observa una disminución de la conductividad eléctrica con la dirección de flujo de agua subterránea. Del análisis de los datos surge un valor medio de 819,23 $\mu\text{S/cm}$, para el cálculo se descarta el valor máximo de 2346 $\mu\text{S/cm}$ que corresponde al pozo *CASP9*, que tendría influencia de los sedimentos de la Formación Camacho. Excluyendo dicho valor, el valor máximo es de 1296 $\mu\text{S/cm}$ en el pozo *CAC7* y el valor mínimo es de 472 $\mu\text{S/cm}$ en el pozo *CAC8*. Excepto el pozo *CASP9*, la totalidad de las muestras se encuentran por debajo del valor máximo permitido de calidad de agua potable según la Norma UNIT 833:2008 (Fig. 32).

pH: los valores más altos generalmente se encuentran en los sectores Este y Sur, relacionados a zonas topográficas más altas, mientras que los valores más bajos se ubican en el sector centro-Norte. Se observa una tendencia de aumento de pH cuando aumenta la concentración de nitratos. No se percibe una relación entre la dirección de flujo de agua subterránea y los valores de pH. En cuanto a los valores de pH obtenidos en campo, se registra un valor medio de 7,29, un valor máximo de 7,58 en el pozo *CAC5* y un valor mínimo de 6,85 en el pozo *CASP17*. Todas las muestras se encuentran en el rango de calidad de agua potable según la Norma UNIT 833:2008 (Fig. 33).

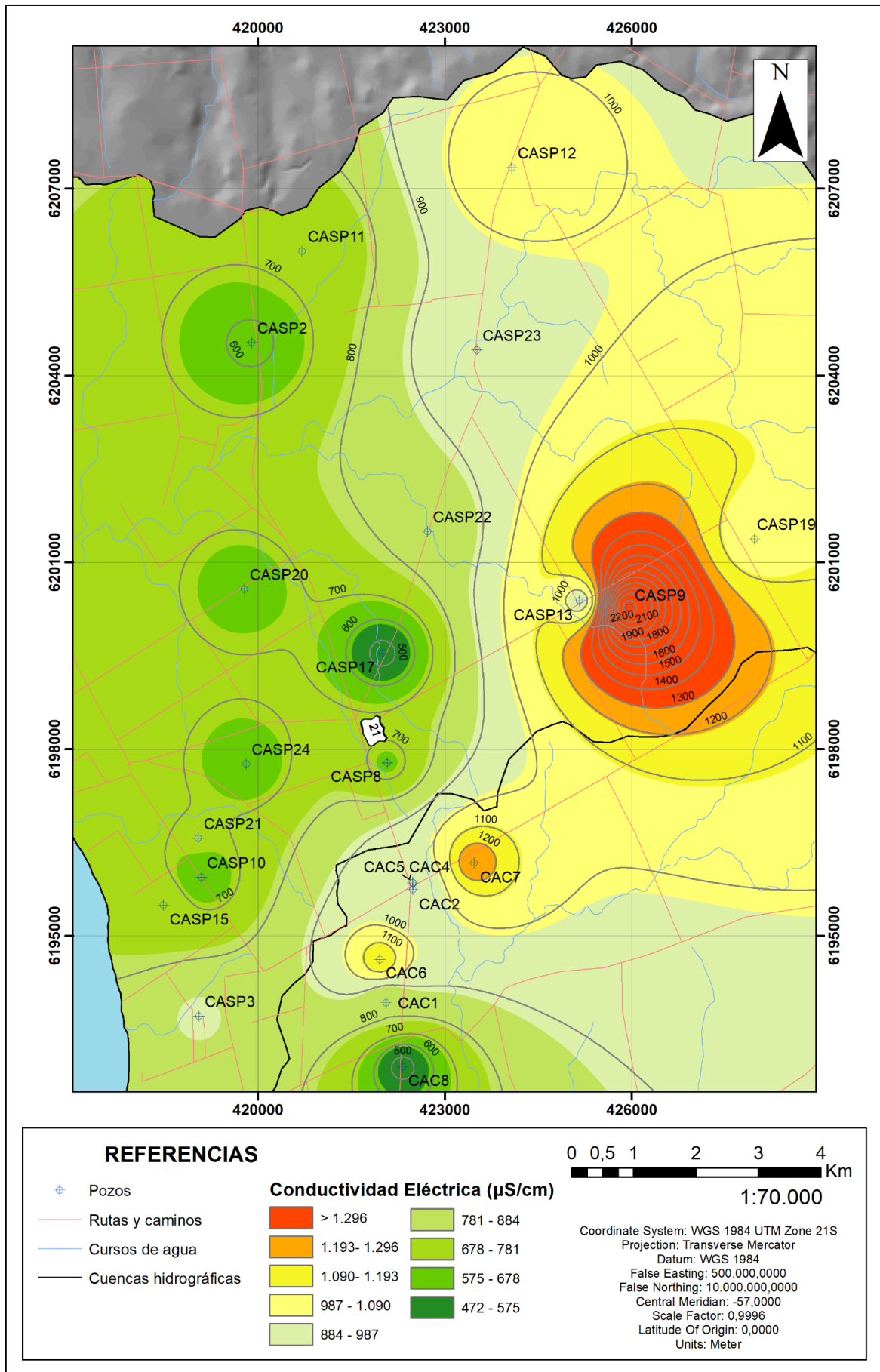


Figura 32. Mapa de conductividad eléctrica ($\mu\text{S/cm}$) en agua subterránea (San Pedro, Colonia) correspondiente al acuífero sedimentario.

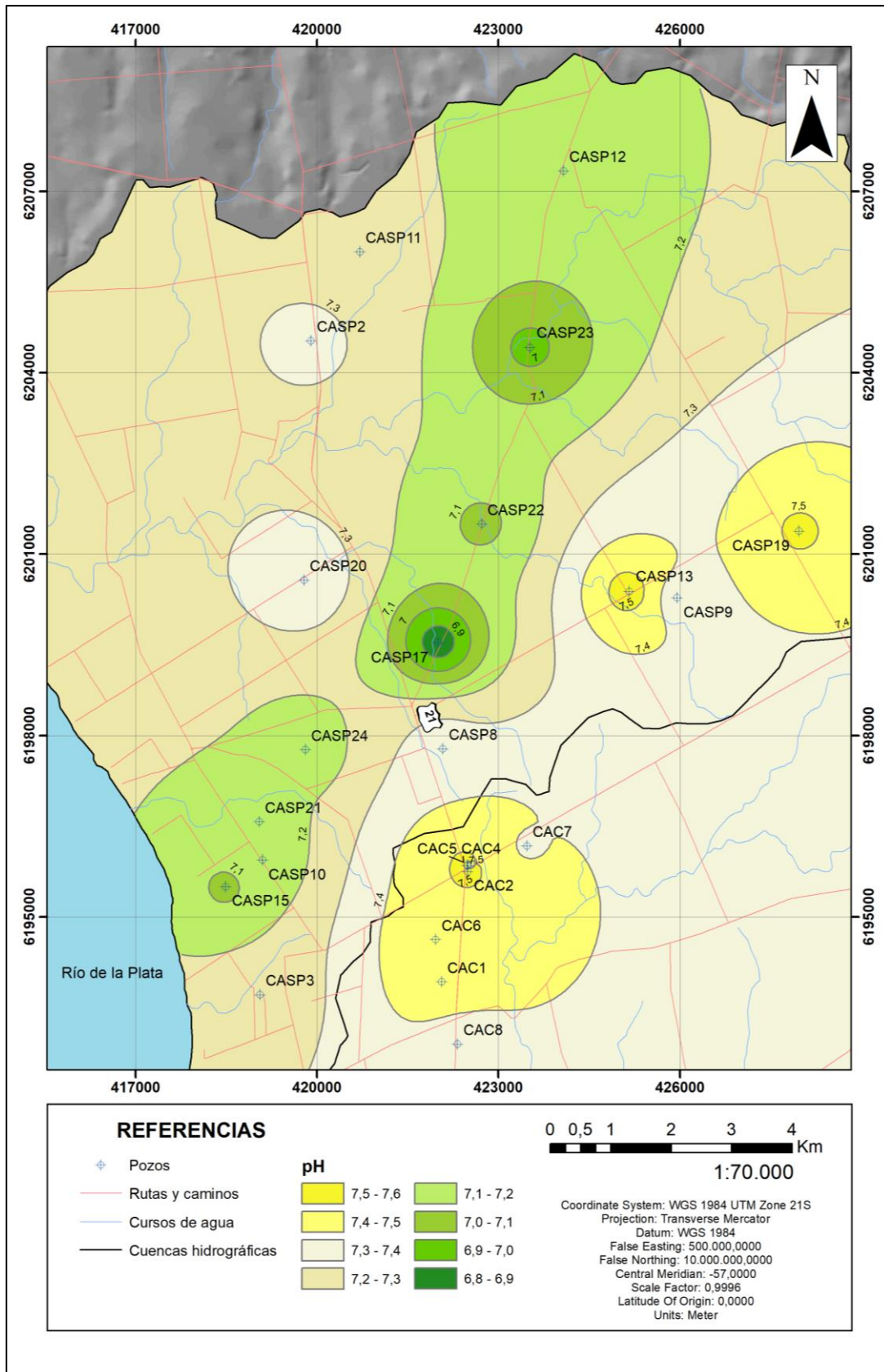


Figura 33. Mapa de pH en agua subterránea (San Pedro, Colonia) correspondiente al acuífero sedimentario.

Eh: los mayores valores se localizan en el sector centro-Norte, mientras que los menores valores se ubican en el sector centro-Sur. No se percibe una relación entre la dirección de flujo de agua subterránea y los valores de Eh. Presenta un valor medio de 197,9 mV, un valor máximo de 236,5 mV en el pozo *CASP17* y un valor mínimo de 165,0 mV en el pozo *CAC4*.

Oxígeno disuelto: los valores más altos se encuentran en los sectores Norte-noroeste y Suroeste, mientras que los valores más bajos se sitúan en el sector central. No se percibe una relación entre la dirección de flujo de agua subterránea y los valores de oxígeno disuelto. Muestra un valor medio de 4,68 ppm, un valor máximo de 6,65 ppm en el pozo *CASP11* y un valor mínimo de 2,69 ppm en el pozo *CASP17*.

Sólidos totales disueltos: se observa que los mayores valores se localizan al Este y centro-Sur, mientras que los menores valores se ubican en el centro-Oeste y Sur, confirmando el principio de la relación entre la conductividad eléctrica y los sólidos totales disueltos. Se observa una disminución de los sólidos totales disueltos con la dirección de flujo de agua subterránea. Del análisis surge un valor medio de 409,68 ppm, para el cálculo se descarta el valor máximo de 1173 ppm que corresponde al pozo *CASP9*. Excluyendo dicho valor, el valor máximo es de 648 ppm en el pozo *CAC7* y el valor mínimo es de 236 ppm en el pozo *CAC8*. Excepto el pozo *CASP9*, la totalidad de las muestras se encuentran por debajo del valor máximo permitido de calidad de agua potable según la Norma UNIT 833:2008 (Fig. 34).

Turbidez: los valores más elevados se localizan en los sectores Sur y centro-Este, mientras que los valores más bajos se ubican en los sectores centro-Norte y Este. No se observa una relación entre la dirección de flujo de agua subterránea y los valores de turbidez. Presenta un valor medio de 0,33 FNU, para el cálculo se descartan los valores máximos de 1,3 y 2,5 FNU correspondientes a los pozos *CASP13* y *CAC2*, respectivamente. Excluyendo dichos valores, el valor máximo es de 1 FNU en el pozo *CASP12* y el valor mínimo es de 0 FNU en los pozos *CASP19* y *CASP23*. Excepto los pozos *CASP13* y *CAC2*, las muestras se encuentran por debajo del valor máximo permitido de calidad de agua potable según la Norma UNIT 833:2008.

Temperatura: los valores más altos se observan en los sectores Suroeste y Norte-noreste, mientras que los valores más bajos se observan en los sectores Sur y centro-Oeste. No se percibe una relación entre la dirección de flujo de agua subterránea y los valores de temperatura. La temperatura media del agua subterránea es de 18,48 °C, el valor máximo es de 20,29 °C en el pozo *CASP10* y el valor mínimo es de 15,35 °C en el pozo *CAC6*. La totalidad de las muestras son consistentes con el rango de temperaturas normales del agua subterránea.

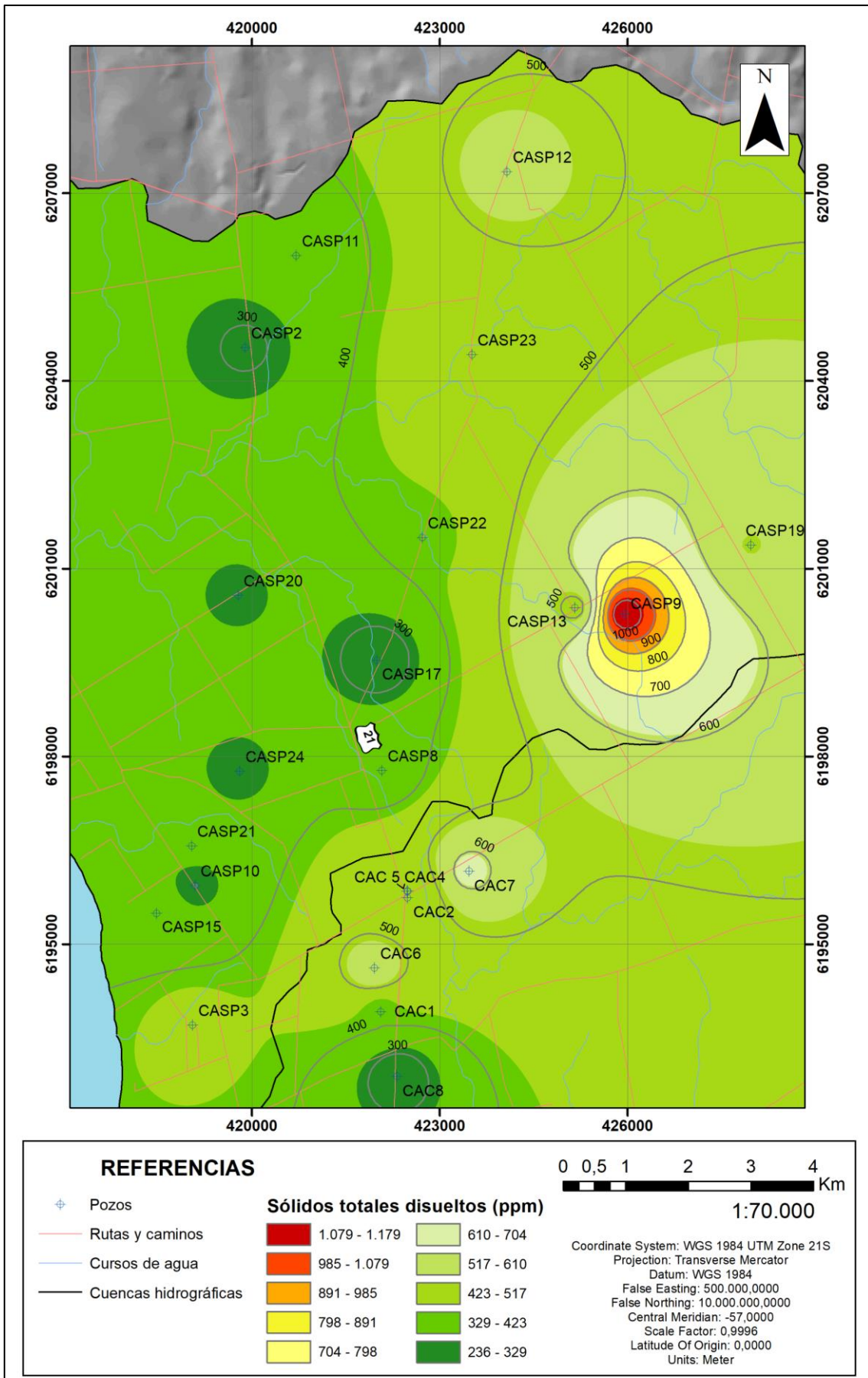


Figura 34. Mapa de sólidos totales disueltos (ppm) en agua subterránea (San Pedro, Colonia) correspondiente al acuífero sedimentario.

Dureza total: los mayores valores generalmente se encuentran en los sectores Sur y centro-Norte, mientras que los menores valores se ubican en los sectores Oeste y Suroeste. No se observa una relación entre la dirección de flujo de agua subterránea y los valores de dureza total. Muestra un valor medio de 264,74 mg/L CaCO₃/L, para el cálculo se descarta el valor máximo de 613,8 mg/L CaCO₃/L que corresponde al pozo CAC6. Excluyendo dicho valor, el valor máximo es de 480,3 mg/L CaCO₃/L en el pozo CASP23 y el valor mínimo es de 165,4 mg/L CaCO₃/L en el pozo CASP20. Según el valor medio de dureza total se la clasifica como agua muy dura. Excepto el pozo CAC6, las muestras se encuentran por debajo del valor máximo permitido de calidad de agua potable según la Norma UNIT 833:2008.

10.3.3.2 Iones mayoritarios y elemento traza (arsénico total)

En función del análisis de los resultados de los análisis químicos, surge que el agua subterránea presenta valores por debajo de la norma actual de agua potable Norma UNIT 833:2008, a excepción de dos muestras (pozos CAC1 y CAC6) que presentan concentraciones de nitratos y 8 muestras que presentan concentraciones de arsénico total que superan el valor máximo permitido según la Norma UNIT 833:2008. Para este último sólo dos muestras (pozos CASP12 y CASP17) se encuentran por debajo del valor sugerido según la OMS (2021). A continuación se detallan los iones mayoritarios y arsénico total. Los datos de los resultados de los análisis químicos se presentan en el Anexo IV.

Aniones:

Cloruros (Cl⁻): las concentraciones más elevadas se localizan en el sector Sur, mientras que las concentraciones más bajas se observan en los sectores Norte y Noreste. No se percibe una relación entre la dirección de flujo de agua subterránea y la concentración de cloruros. Del análisis de los datos surge que la concentración media de este elemento es de 27,62 mg/L, con un valor máximo de 107,74 mg/L en el pozo CAC6 y un valor mínimo de 3,68 mg/L en el pozo CASP12. Todas las muestras se encuentran por debajo del valor máximo permitido de calidad de agua potable según la Norma UNIT 833:2008.

Nitratos (NO₃⁻): se observa que las concentraciones más altas se distribuyen al Sur, mientras que las concentraciones más bajas generalmente se registran al Noroeste y centro-Norte, probablemente asociadas a condiciones de acuífero semiconfinado. No se observa una relación entre la dirección de flujo de agua subterránea y la concentración de nitratos. La concentración media para nitratos es de 18,45 mg/L, para el cálculo se descartan los valores máximos de 60,55 y 192,68 mg/L correspondientes a los pozos CAC1 y CAC6, respectivamente. Excluyendo dichos valores, el valor máximo es de 47,75 mg/L en el pozo CAC7 y el valor mínimo es de 0,12 mg/L en el pozo CAC4. Excepto los pozos CAC1 y CAC6, las muestras se encuentran por debajo del valor máximo permitido de calidad de agua potable según la Norma UNIT 833:2008 (Fig. 35).

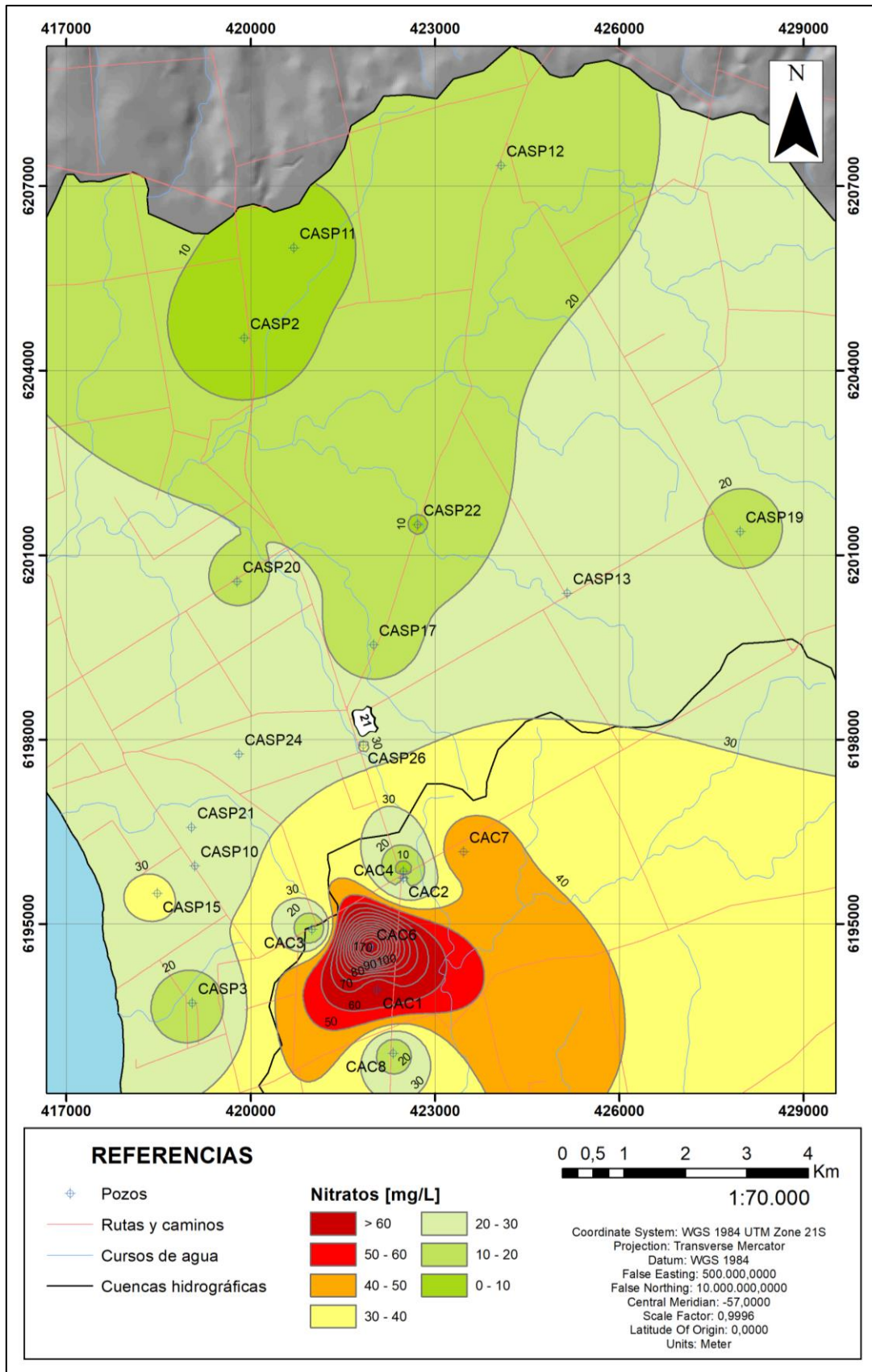


Figura 35. Mapa de concentración de nitratos [mg/L] en agua subterránea (San Pedro, Colonia) correspondiente al acuífero sedimentario.

Bicarbonato (HCO_3^-): las mayores concentraciones se observan en los sectores Sur y centro-Este, mientras que las menores concentraciones se observan en los sectores Sur-suroeste y Suroeste. Se distingue una disminución de la concentración de bicarbonato con la dirección de flujo de agua subterránea. A partir de los resultados de alcalinidad, la concentración media de bicarbonato es de 470,13 mg/L, con un valor máximo de 677,1 mg/L en el pozo *CAC7* y un valor mínimo de 309,88 mg/L en los pozos *CAC3* y *CASP24*. Para este elemento la Norma UNIT 833:2008 no establece un valor máximo permitido de calidad de agua potable.

Sulfatos (SO_4^{2-}): las concentraciones más altas se localizan en los sectores Sur y Sur-sureste, mientras que las concentraciones más bajas se registran en los sectores centro-Oeste y Sur-oeste. Se distingue una disminución de la concentración de sulfatos con la dirección de flujo de agua subterránea. La concentración media de este elemento es de 21,59 mg/L, el valor máximo es de 73,92 mg/L en el pozo *CAC6* y el valor mínimo es de 6,86 mg/L en el pozo *CASP17*. Todas las muestras se encuentran por debajo del valor máximo permitido de calidad de agua potable según la Norma UNIT 833:2008.

Arsénico total (As): la alta concentración de arsénico total generalmente tiene un origen vinculado a procesos naturales, así como procesos antropogénicos. Se observa una tendencia de aumento de la concentración de arsénico total cuando aumenta la concentración de nitratos, posiblemente debido a la actividad agropecuaria. La concentración de arsénico total más anómala se registra en el sector Sur, mientras que la menor concentración se observa en el sector central. No se observa una relación entre la dirección de flujo de agua subterránea y la concentración de arsénico total. Del análisis de los datos surge que la concentración media es de 0,017 mg/L, con un valor máximo de 0,030 mg/L en el pozo *CAC4* y un valor mínimo de 0,006 mg/L en el pozo *CASP17*. Se observa que 8 muestras superan el valor máximo permitido según la Norma UNIT 833:2008 (Fig. 36) y dos muestras correspondientes a los pozos *CASP12* y *CASP17* se encuentran por debajo del valor sugerido según la OMS (2021) (Fig. 37).

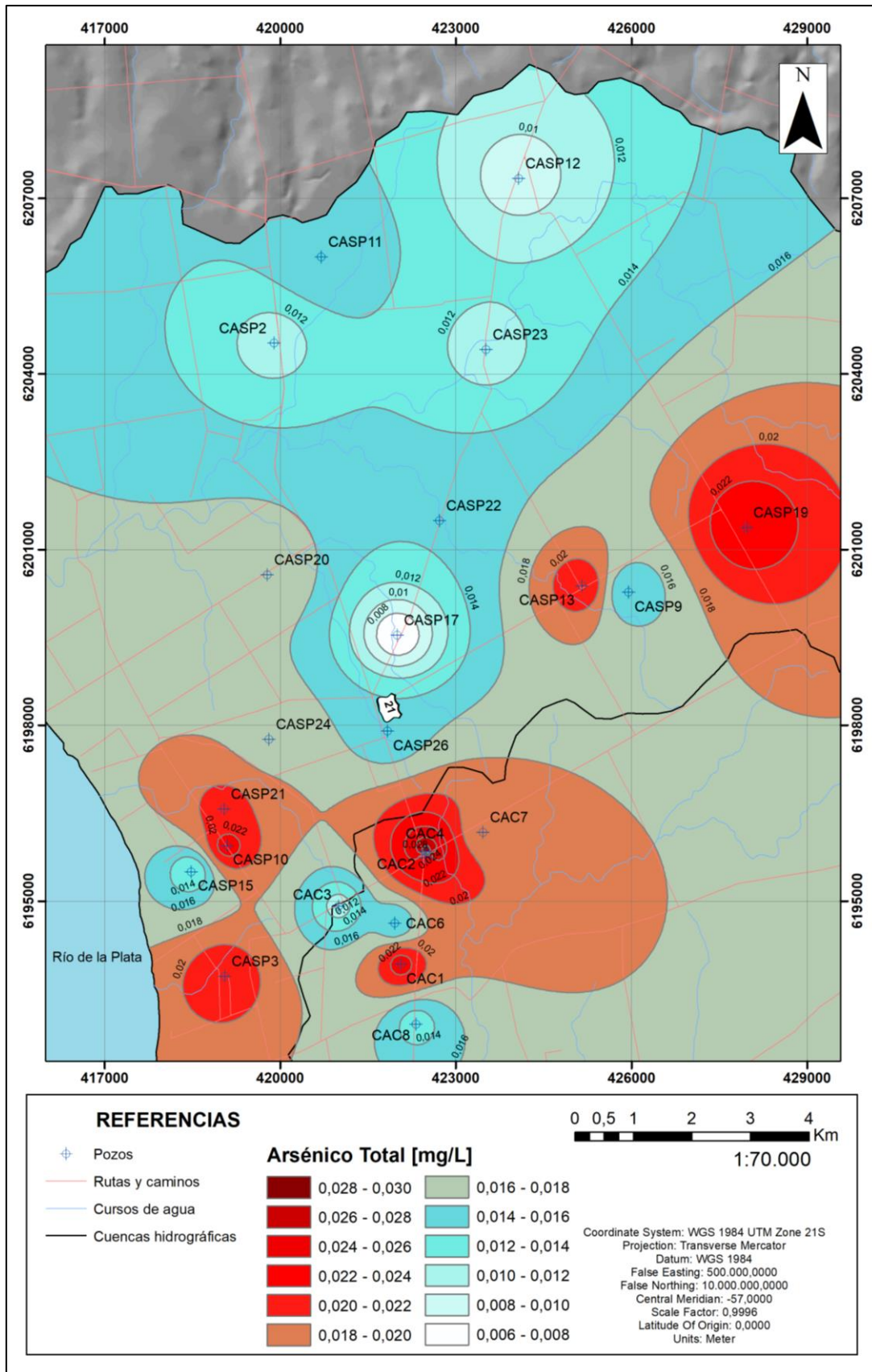


Figura 36. Mapa de concentración de arsénico total [mg/L] en agua subterránea (San Pedro, Colonia) según Norma UNIT 833:2008 correspondiente al acuífero sedimentario.

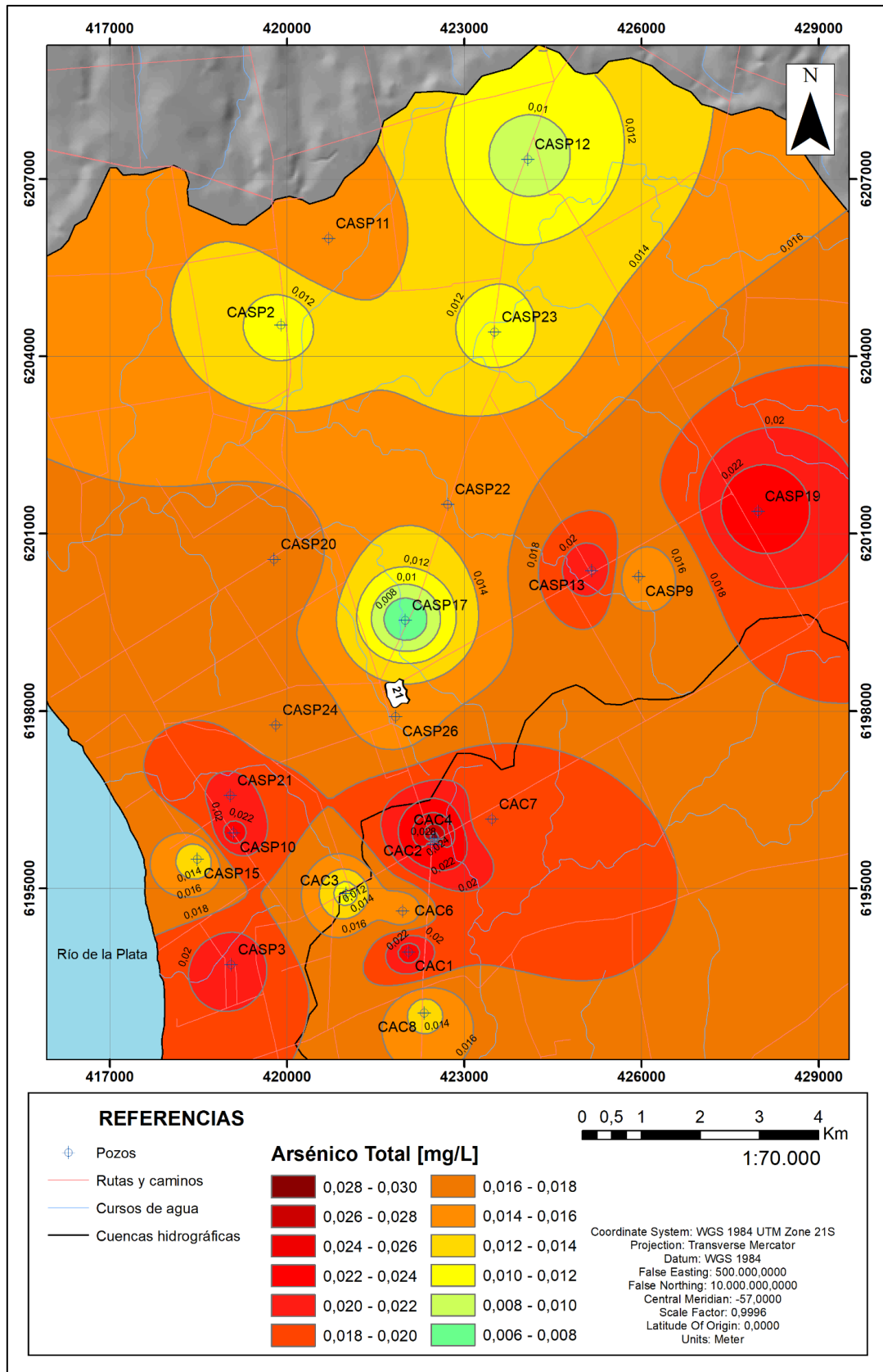


Figura 37. Mapa de concentración de arsénico total [mg/L] en agua subterránea (San Pedro, Colonia) según Norma OMS (2021) correspondiente al acuífero sedimentario.

Cationes:

Sodio (Na⁺): las concentraciones más elevadas se observan en los sectores Este y Sur-sureste, mientras que las concentraciones más bajas se registran en los sectores Sur-suroeste y Oeste-suroeste. Se distingue una tendencia a la disminución de la concentración de sodio con la dirección de flujo de agua subterránea. Con respecto a la concentración media de sodio surge un valor de 39,47 mg/L. El valor máximo es de 107,77 mg/L en el pozo *CASP9* y el valor mínimo es de 7,0 mg/L en el pozo *CAC3*. Todas las muestras se encuentran por debajo del valor máximo permitido de calidad de agua potable según la Norma UNIT 833:2008.

Potasio (K⁺): las concentraciones más altas se encuentran en los sectores Central y Norte-noroeste, mientras que las concentraciones más bajas se ubican en los sectores Oeste-suroeste y Sur-sureste. No se percibe una relación entre la dirección de flujo de agua subterránea y la concentración de potasio. El elemento presenta una concentración media de 7,79 mg/L, con un valor máximo de 17,38 mg/L en el pozo *CASP22* y un valor mínimo de 0,02 mg/L en el pozo *CASP21*. Para este elemento la Norma UNIT 833:2008 no establece un valor máximo permitido de calidad de agua potable.

Magnesio (Mg²⁺): las mayores concentraciones se observan en los sectores Suroeste y Central, mientras que las menores concentraciones se registran en los sectores Oeste-suroeste y Sur-sureste. No se observa una relación entre la dirección de flujo de agua subterránea y la concentración de magnesio. La concentración media de este elemento es de 8,41 mg/L, con un valor máximo de 19,55 mg/L en el pozo *CASP10* y un valor mínimo de 0,32 mg/L en el pozo *CASP21*. Para este elemento la Norma UNIT 833:2008 no establece un valor máximo permitido de calidad de agua potable.

Calcio (Ca²⁺): las concentraciones más elevadas se observan en los sectores Central y Suroeste, mientras que las menores concentraciones se observan en los sectores Sur y Sur-sureste. No se percibe una relación entre la dirección de flujo de agua subterránea y la concentración de calcio. Con respecto a la concentración media de calcio surge un valor de 10,24 mg/L. El valor máximo es de 32,32 mg/L en el pozo *CASP22* y el valor mínimo es de 1,26 mg/L en el pozo *CAC4*. Para este elemento la Norma UNIT 833:2008 no establece un valor máximo permitido de calidad de agua potable.

El análisis de los datos se realizó a partir de la elaboración de los diagramas de Piper, Stiff, Schöeller – Berkloff y clasificación de agua destinada al riego (RAS).

A partir del análisis del diagrama de Piper realizado se observa que 15 muestras se clasifican como aguas bicarbonatadas sódicas, 4 como aguas bicarbonatadas cálcicas y 2 como aguas bicarbonatadas magnésicas (Fig. 38). El predominio del ion sodio es producto de procesos de intercambio catiónico en la evolución normal de las aguas subterráneas. Respecto a la variación aniónica, se distingue un aumento del ion bicarbonato, mientras se registra en una muestra un aumento del ion cloruro en relación con las restantes.

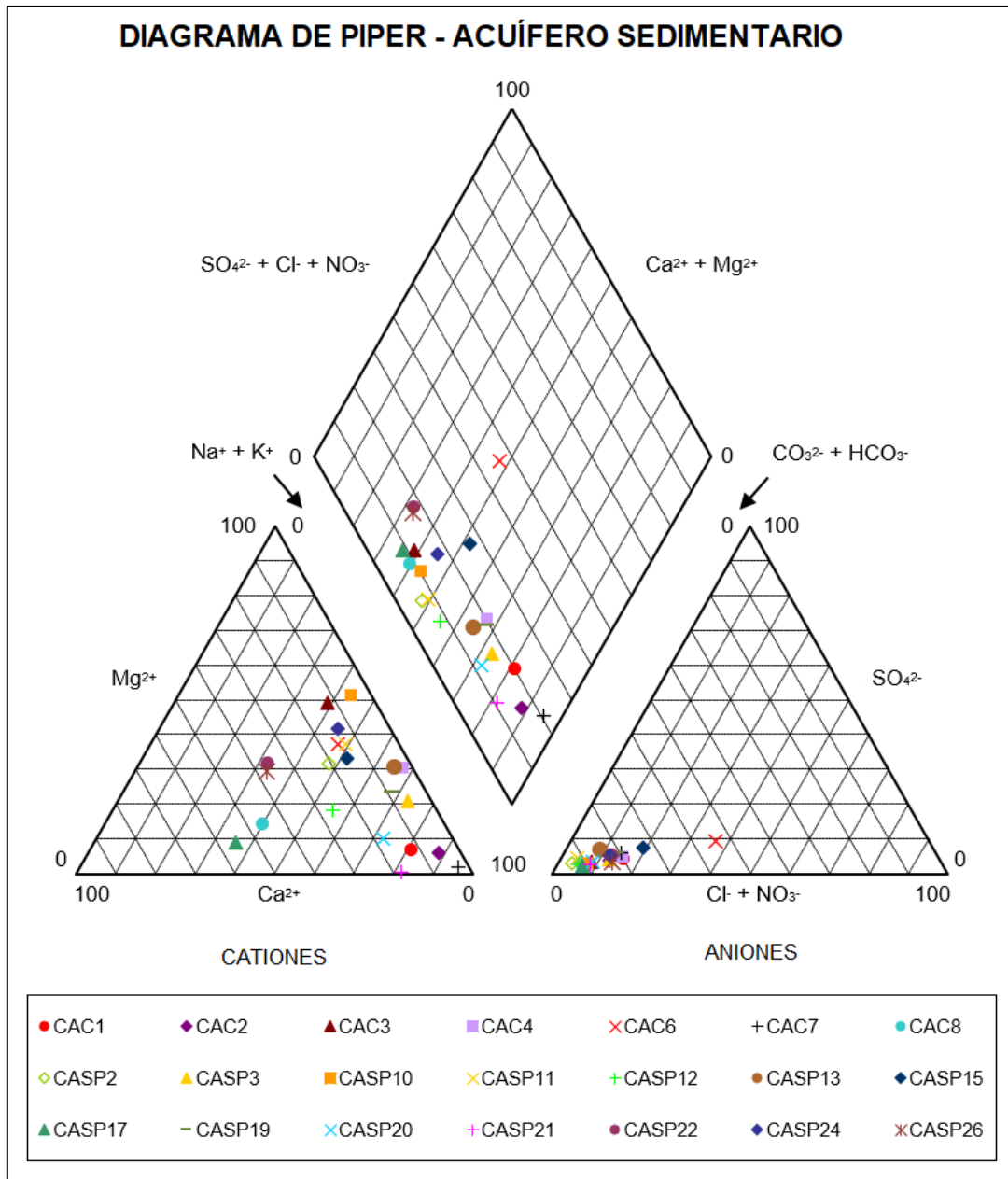


Figura 38. Diagrama de Piper correspondiente al acuífero sedimentario.

A partir de los diagramas de Stiff generados para cada muestra se elaboró un mapa hidroquímico para visualizar la distribución espacial que presentan las aguas (Fig. 39). Se observa que el patrón hidroquímico que se presenta en la mayoría de las muestras de agua sigue la siguiente secuencia: $\text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ y $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^- > \text{Cl}^-$. El mapa hidroquímico muestra que las aguas bicarbonatadas sódicas generalmente se distribuyen en la zona de descarga, y las aguas bicarbonatadas cálcicas y magnésicas se localizan en los sectores Central y Suroeste, respectivamente. A partir del análisis para los distintos tipos de aguas no se observa una relación entre la conductividad eléctrica y la profundidad total de pozos. Los pozos que presentan profundidades entre 3,9 y 37 m para ambos tipos de construcción de pozos, registran valores de conductividad eléctrica entre 472 y 1296 $\mu\text{S}/\text{cm}$. No se observa un rango de profundidad que se corresponda con un cierto tipo de agua, lo que permite sugerir mezclas de aguas debido a tiempos de circulación, espesores y variabilidad litológica.

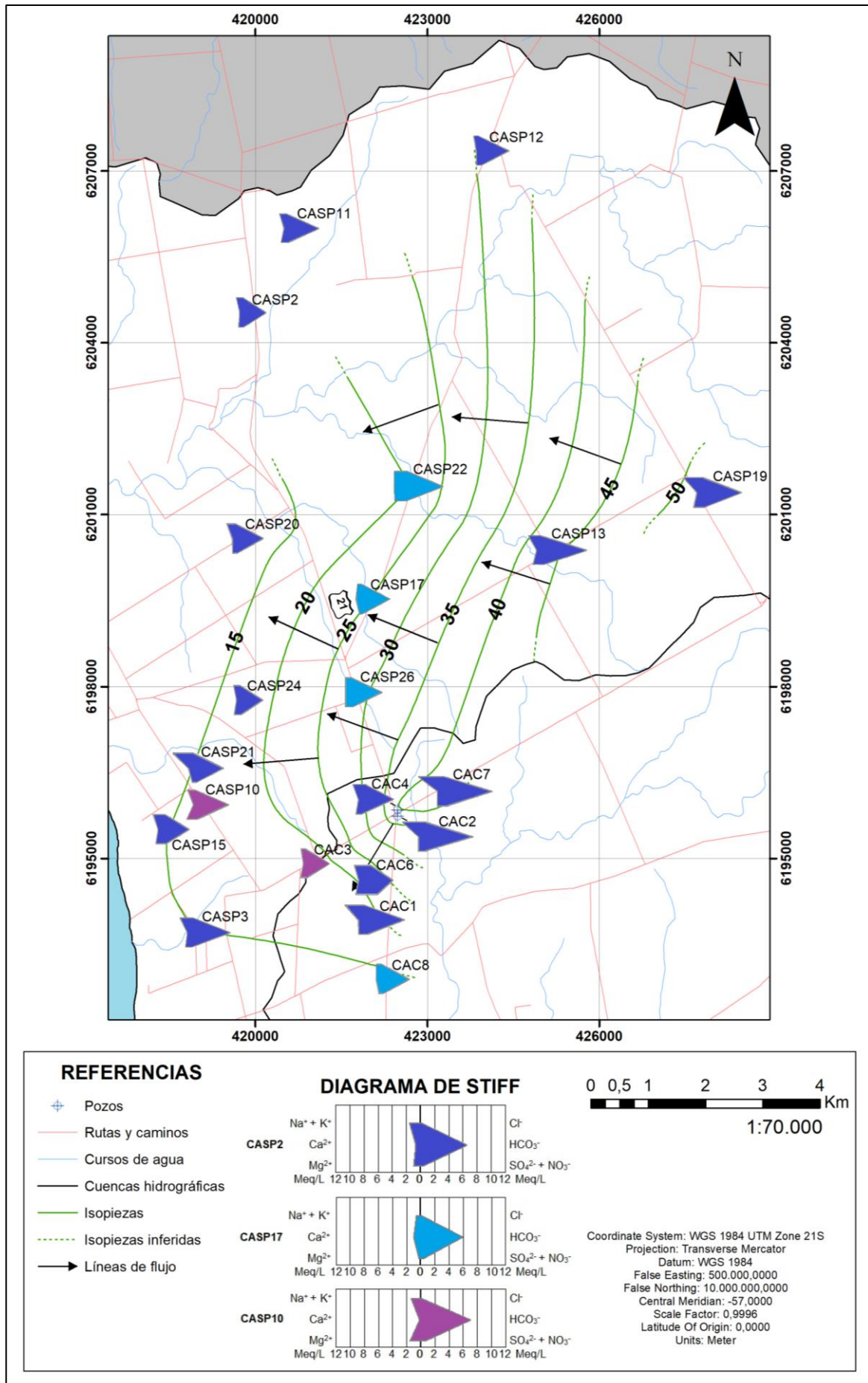


Figura 39. Mapa hidroquímico según Stiff (San Pedro, Colonia) correspondiente al acuífero sedimentario.

Del análisis de los diagramas de Schöeller – Berkloff realizados para el agua subterránea del acuífero sedimentario se observa que los iones predominantes son el sodio entre los cationes, indicando aguas de larga residencia y bicarbonato entre los aniones (Fig. 40). Cabe agregar que se realizaron dos diagramas para poder obtener una mejor visualización de las concentraciones de iones y dos muestras (CASP9 y CASP23) no se graficaron dado que la concentración aniónica no fue detectable. El diagrama permite visualizar la composición química entre las muestras analizadas, respecto a los iones restantes, se observan concentraciones más altas de calcio para 13 pozos, mientras que se observan concentraciones más altas de cloruro para 11 pozos.

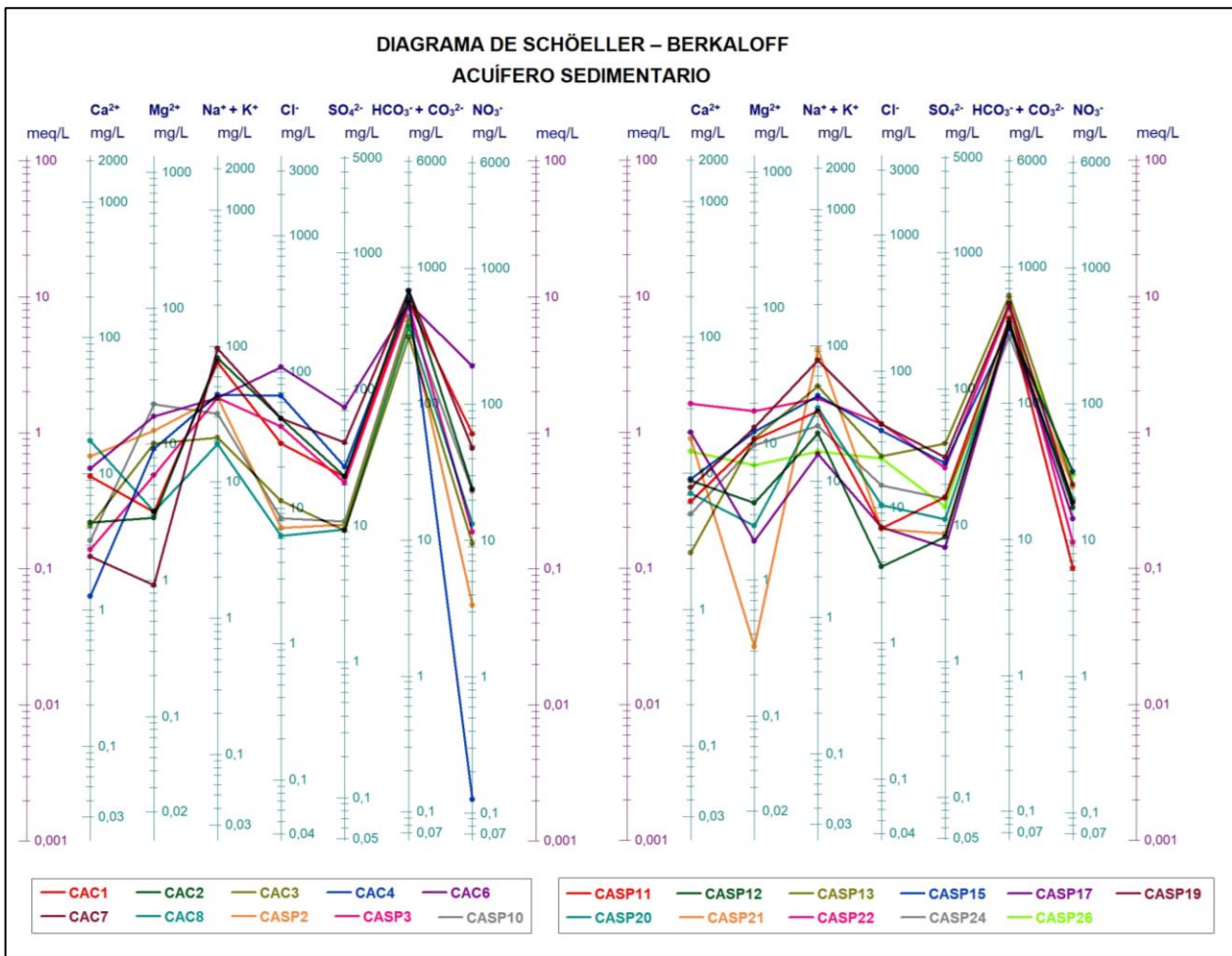


Figura 40. Diagramas de Schöeller – Berkloff correspondientes al acuífero sedimentario.

A partir del diagrama RAS se observa que la mayoría de las muestras de agua del acuífero sedimentario se clasifican como C3-S1 y C2-S1, siendo de alta a media salinidad y bajo contenido en sodio, utilizándose el agua para riego en suelos con buen drenaje y en cultivos que sean muy tolerantes a la salinidad (Fig. 41).

Las dos muestras de agua restantes se clasifican como C3-S2 y C3-S3, presentando alta salinidad y medio a alto contenido en sodio. Ambas muestras comparten características semejantes al predominante, aunque en el segundo caso existe gran peligro de acumulación de sodio en el suelo. Para corregir el posible exceso de sodio del suelo se aconseja el aporte de materia orgánica y la utilización de yeso.

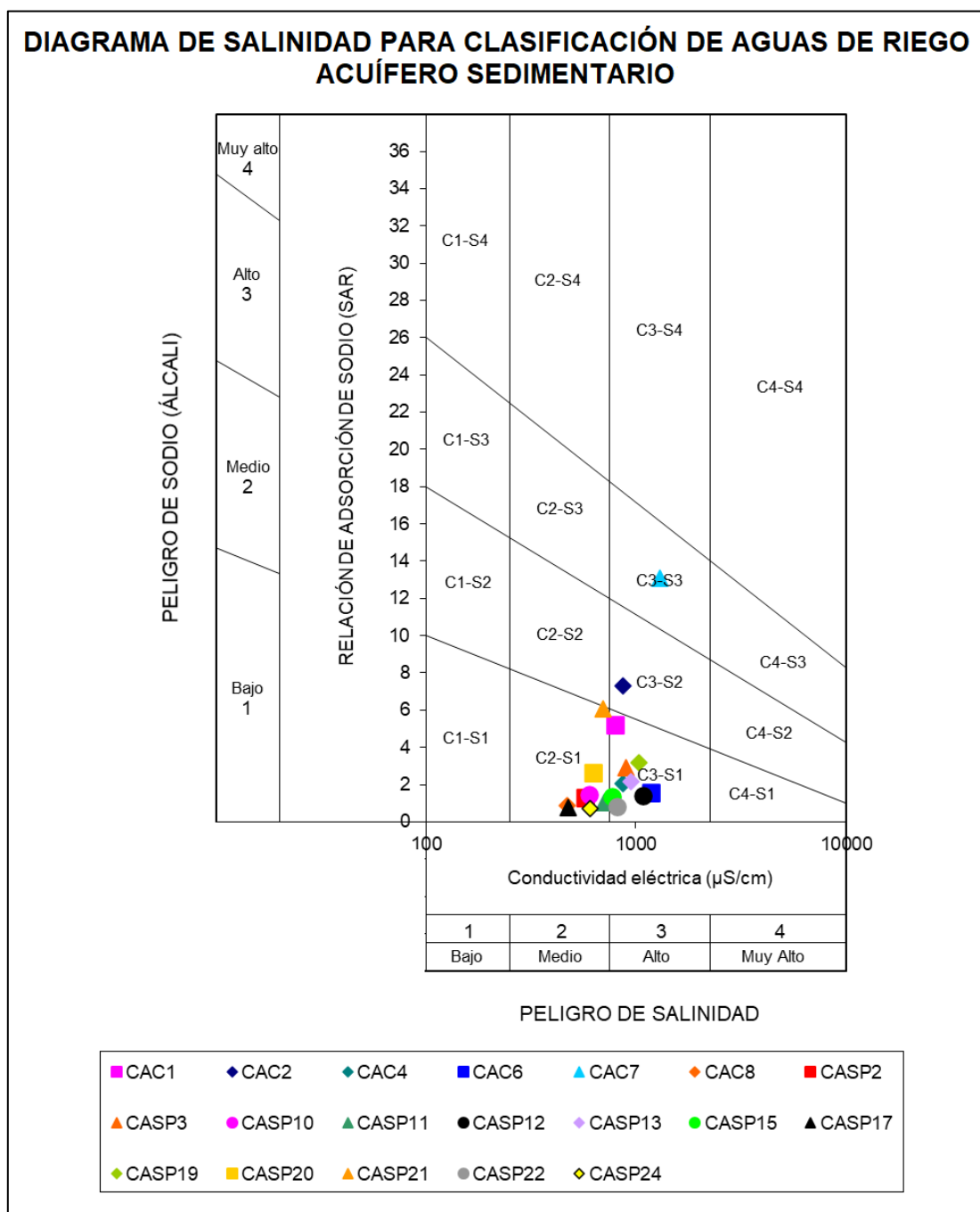


Figura 41. Diagrama de clasificación de agua destinada al riesgo (RAS) correspondiente al acuífero sedimentario.

10.4 Vulnerabilidad

Margat (1968) introduce el término “vulnerabilidad” al referirse a la “vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas”, menciona que la zona no saturada se comporta como filtro natural, proporcionando un cierto grado de protección de un acuífero frente a contaminantes de origen tanto natural, como derivados de actividades humanas. En la Tabla 8 se presentan las definiciones propuestas por diferentes autores en el concepto de vulnerabilidad.

Tabla 8. Definiciones de vulnerabilidad.

EPA (1991)	Relativa facilidad con la que un contaminante (plaguicida) aplicado en una superficie, puede alcanzar al acuífero en función de un conjunto dado de prácticas agrícolas empleadas, características de plaguicidas y susceptibilidad hidrogeológica.
Foster & Hirata (1991)	Características intrínsecas que determinan la susceptibilidad de un acuífero a ser adversamente afectado por una carga contaminante.
Vrba & Zaporozec (1994)	Propiedad intrínseca de un sistema de aguas subterráneas, que depende de la sensibilidad del sistema a los impactos naturales y antropogénicos.
Custodio (1995)	La vulnerabilidad a la polución expresa la incapacidad del sistema para absorber las alteraciones, tanto naturales como artificiales.

Para la determinación del grado de vulnerabilidad existen diversos métodos que se emplean en función de la disponibilidad de información, debido a ello en el área de estudio se aplican los métodos GOD y DRASTIC.

10.4.1 Método GOD

Foster (1987) propone el método GOD que consiste en la asignación de índices entre 0 y 1 a tres variables, que son las que nominan el acrónimo: **G** (Groundwater occurrence: condición de confinamiento del acuífero); **O** (Overall aquifer class: litología de la zona no saturada, en términos de grado de consolidación y características litológicas); **D** (Depth: profundidad del agua subterránea o techo del acuífero confinado).

El índice de vulnerabilidad GOD se obtiene al multiplicar los tres índices, el resultado final puede variar entre 1 (vulnerabilidad máxima) y 0 (vulnerabilidad mínima) (Fig. 42).

$$iV_{GOD} = G \times O \times D \quad \text{Foster (1987)}$$

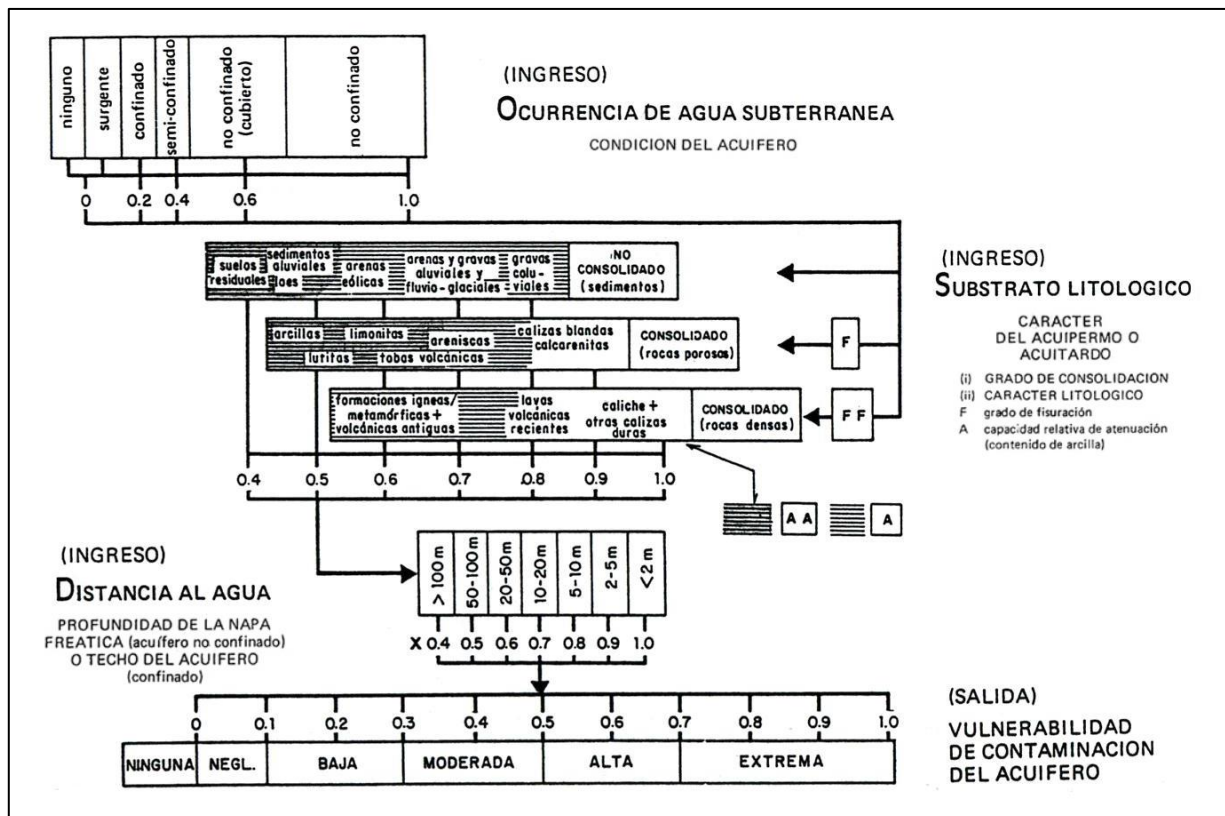


Figura 42. Método GOD para caracterizar la vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero. Modificado de Foster (1987).

La determinación de la vulnerabilidad mediante el método GOD se realizó en función de la geología e hidrogeología conforme a la situación del área de estudio. A continuación se presentan los índices asignados a cada parámetro para cada acuífero.

10.4.1.1 Aplicación del método GOD para el acuífero fracturado

Condición de confinamiento del acuífero

Se distinguen tres situaciones: **(1)** el sistema acuífero se considera confinado, cuando la Formación Libertad se encuentra aflorando, y se le asigna un índice de 0,2; **(2)** el sistema acuífero se considera confinado, cuando aflora la Formación Raigón, y se le otorga un índice de 0,2; y **(3)** cuando los granitos afloran el sistema acuífero se considera no confinado, asignándosele un índice de 0,8.

Litología de la zona no saturada

En función de la geología, la cobertura del sistema acuífero fracturado se constituye mayormente por areniscas de granulometría variable, conglomerados y niveles de arcillas correspondientes a la Formación Raigón, y principalmente por lodolitas y loess correspondientes a la Formación Libertad. Se distinguen tres situaciones: **(1)** cuando la cobertura del acuífero se constituye por los sedimentos de la Formación Libertad, se le asigna un índice de 0,5; **(2)** cuando la cobertura del acuífero se constituye por los sedimentos de la Formación Raigón, se le asigna un índice de 0,7; y **(3)** cuando la cobertura del acuífero se constituye por los propios cuerpos graníticos se le otorga un índice de 0,6.

Profundidad del agua subterránea

La profundidad de nivel de agua medida en los pozos varía entre 0,78 a 19,17 m, distinguiéndose dos situaciones: **(1)** cuando el acuífero es confinado, el nivel de agua en los pozos oscila entre 1,31 a 9,87 m, en función de la cantidad de pozos que se encuentran en el rango de 5 – 10 m, se le asigna un índice de 0,8; y **(2)** cuando el acuífero es no confinado, los niveles de agua en los pozos son de 0,78 m y 19,17 m, a partir del promedio, se le otorga un índice de 0,8.

Tabla 9. Cálculo de la vulnerabilidad del acuífero fracturado mediante la aplicación del método GOD.

Geología	Formación Libertad	Formación Raigón	Granito
Condición de confinamiento del acuífero	0,2	0,2	0,8
Litología de la zona no saturada	0,5	0,7	0,6
Profundidad del agua subterránea	0,8	0,8	0,8
PUNTAJE	0,08	0,112	0,384
VULNERABILIDAD	DESPRECIABLE A BAJA	BAJA	MODERADA

10.4.1.2 Aplicación del método GOD para el acuífero sedimentario

Condición de confinamiento del acuífero

Se distinguen dos situaciones: **(1)** el sistema acuífero se considera semiconfinado, cuando la Formación Libertad se encuentra aflorando, y se le asigna un índice de 0,4; y **(2)** el sistema acuífero se considera no confinado, cuando la Formación Raigón aflora, y se establece un índice de 0,8.

Litología de la zona no saturada

Se distinguen en el área de estudio dos situaciones: **(1)** cuando la cobertura del acuífero se constituye principalmente por lodolitas y loess correspondientes a la Formación Libertad, se le asigna un índice de 0,5; y **(2)** cuando la cobertura del acuífero se constituye mayormente por areniscas de granulometría variable, conglomerados y niveles de arcillas correspondientes a la Formación Raigón, se le otorga un índice de 0,7.

Profundidad del agua subterránea

La profundidad del nivel de agua medida en los pozos varía entre 1,69 a 19,77 m, distinguiéndose dos situaciones: **(1)** cuando el acuífero es semiconfinado, el nivel de agua en los pozos oscila entre 1,69 a 19,77 m, en función de la cantidad de pozos que se encuentran en el rango de 5 – 10 m, se le asigna un índice de 0,8; y **(2)** cuando el acuífero es no confinado, el nivel de agua en el pozo es de 5,19 m, y se le asigna un índice de 0,8.

Tabla 10. Cálculo de la vulnerabilidad del acuífero sedimentario mediante la aplicación del método GOD.

Geología	Formación Libertad	Formación Raigón
Condición de confinamiento del acuífero	0,4	0,8
Litología de la zona no saturada	0,5	0,7
Profundidad del agua subterránea	0,8	0,8
PUNTAJE	0,16	0,448
VULNERABILIDAD	BAJA	MODERADA

10.4.1.3 Mapa de vulnerabilidad GOD

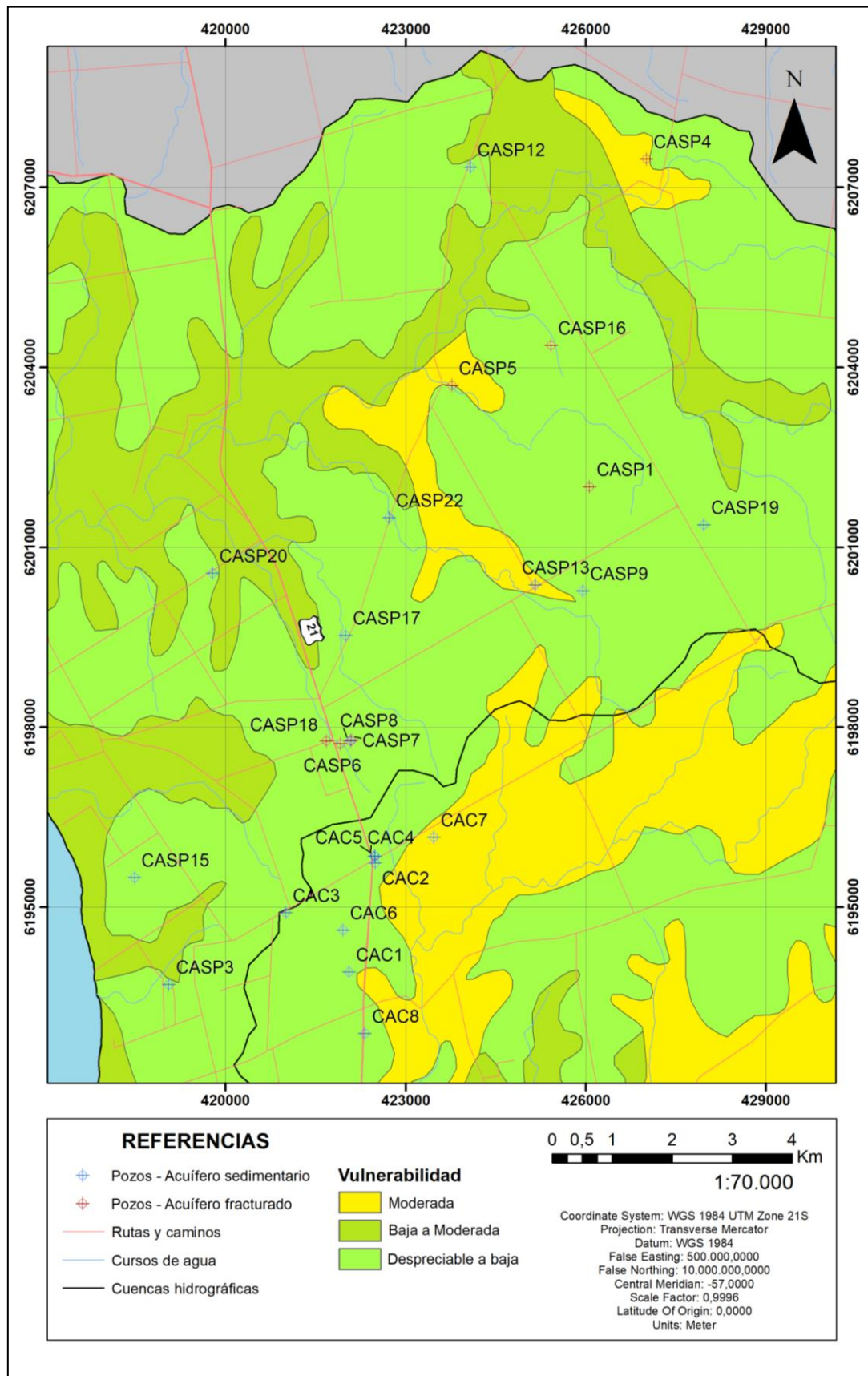


Figura 43. Mapa de vulnerabilidad mediante la aplicación del método GOD (San Pedro, Colombia).

10.4.2 Método DRASTIC

Aller et al. (1987) propone el método DRASTIC para la Environmental Protection Agency (EPA, Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos). Se basa en la evaluación de la vulnerabilidad del acuífero mediante la asignación de índices de 1 (mínima vulnerabilidad) a 10 (máxima vulnerabilidad), de acuerdo a las características y el comportamiento de las siguientes variables que definen el acrónimo DRASTIC: **D** (Depth: profundidad del agua subterránea), **R** (Recharge: recarga neta), **A** (Aquifer: litología del acuífero), **S** (Soil: tipo de suelo), **T** (Topography: topografía), **I** (Impact: naturaleza de la zona no saturada), **C** (Hydraulic conductivity: conductividad hidráulica del acuífero). A continuación se presentan las valoraciones para cada parámetro (Tabla 11).

Tabla 11. Valoración de parámetros para el método DRASTIC (Vargas & Tosse, 2010).

D (Profundidad, m)	D_r
0 – 1,5	10
1,5 – 4,6	9
4,6 – 9,1	7
9,1 – 15,2	5
15,2 – 22,9	3
22,9 – 30,5	2
> 30,5	1

R (Recarga, mm)	R_r
0 – 50	1
50 – 103	3
103 – 178	6
178 – 254	8
> 254	9

A (Litología del acuífero)	Valoración A_r	Valor típico A_r
Lutita masiva	1 – 3	2
Metamórfica/Ígnea	2 – 5	3
Metamórfica/Ígnea meteorizada	3 – 5	4
Arenas y gravas de origen glacial	4 – 6	5
Secuencias de arenisca, caliza y lutitas	5 – 9	6
Arenisca masiva	4 – 9	6
Caliza masiva	4 – 9	6
Arena o grava	4 – 9	8
Basaltos	2 – 10	9
Caliza kárstica	9 – 10	10

S (Tipo de suelo)	S_r
Delgado o ausente	10
Grava	10
Arena	9
Agregado arcilloso o compactado	7
Arenisca margosa	6
Marga	5
Limo margoso	4
Arcilla margosa	3
Estiércol-cieno	2
Arcilla no compactada y consolidada	1

T (Pendiente, %)	T_r
0 – 2	10
2 – 6	9
6 – 12	5
12 – 18	3
>18	1

I (Naturaleza de la zona no saturada)	Valoración I_r	Valor típico I_r
Capa confinante	1	1
Cieno-arcilla	2 – 6	3
Lutita	2 – 5	3
Caliza	2 – 7	6
Arenisca	4 – 8	6
Secuencias de arenisca, caliza y lutita	4 – 8	6
Arena o grava con contenido de cieno y arcilla significativo	4 – 8	6
Metamórfica/Ígnea	2 – 8	4
Grava y arena	6 – 9	8
Basalto	2 – 10	9
Caliza kárstica	8 – 10	10

C (Conductividad hidráulica)		C_r
m/día	cm/s	
0,04 – 4,08	$4,6 \cdot 10^{-5} - 4,7 \cdot 10^{-3}$	1
4,08 – 12,22	$4,7 \cdot 10^{-3} - 1,4 \cdot 10^{-2}$	2
12,22 – 28,55	$1,4 \cdot 10^{-2} - 3,4 \cdot 10^{-2}$	3
28,55 – 40,75	$3,4 \cdot 10^{-5} - 4,7 \cdot 10^{-2}$	6
40,75 – 81,49	$4,7 \cdot 10^{-2} - 9,5 \cdot 10^{-2}$	8
> 81,49	$> 9,5 \cdot 10^{-2}$	10

Además de la asignación de índices a cada parámetro, se asigna un factor de ponderación que varía según el parámetro implicado y depende de la influencia de agentes contaminantes pesticidas ya que éstos son menos volátiles y más persistentes (Tabla 12).

Tabla 12. Factores de ponderación (Vargas & Tosse, 2010).

Factores de ponderación							
Tipo de contaminante	D _w	R _w	A _w	S _w	T _w	I _w	C _w
Pesticida	5	4	3	5	3	4	2
No Pesticida	5	4	3	2	1	5	3

El índice de vulnerabilidad DRASTIC se obtiene de la sumatoria de la multiplicación de cada parámetro por su factor de ponderación, según se indica en la siguiente expresión:

$$iV_{DRASTIC} = (D_r \times D_w) + (R_r \times R_w) + (A_r \times A_w) + (S_r \times S_w) + (T_r \times T_w) + (I_r \times I_w) + (C_r \times C_w)$$

Aller et al. (1987)

r = valor de clasificación o valoración

w = factor de ponderación

El valor del índice de vulnerabilidad general DRASTIC varía entre 23 (mínima) y 230 (máxima), generalmente en la práctica el índice varía entre 50 y 200. Si existen agentes contaminantes pesticidas, los valores se encuentran comprendidos entre 26 y 260. A continuación se presenta el grado de vulnerabilidad de acuerdo al valor resultante (Tabla 13).

Tabla 13. Evaluación de la vulnerabilidad según el método DRASTIC (Vargas & Tosse, 2010).

Vulnerabilidad general		Vulnerabilidad pesticida	
Grado de vulnerabilidad	Índice DRASTIC	Grado de vulnerabilidad	Índice DRASTIC
Muy bajo	23 – 64	Muy bajo	26 – 73
Bajo	65 – 105	Bajo	74 – 120
Moderado	106 – 146	Moderado	121 – 167
Alto	147 – 187	Alto	168 – 214
Muy alto	188 – 230	Muy alto	215 – 260

La determinación de la vulnerabilidad mediante el método DRASTIC se realizó en función de la geología e hidrogeología conforme a la situación del área de estudio. A continuación se presentan los índices asignados a cada parámetro para cada acuífero. Cabe agregar que no se dispone de ensayos de bombeo para efectuar la valoración del parámetro C, por ello se estimó en función de la litología.

10.4.2.1 Aplicación del método DRASTIC para el acuífero fracturado

Profundidad del agua subterránea

La profundidad de nivel de agua medida en los pozos varía entre 0,78 y 19,17 m, distinguiéndose dos situaciones: **(1)** cuando el acuífero es confinado, el nivel de agua en los pozos oscila entre 1,31 a 9,87 m, en función de la cantidad de pozos que se encuentran en el rango de 4,6 – 9,1 m, se le asigna un índice de 7; y **(2)** cuando el acuífero es no confinado, se presentan niveles de agua en los pozos de 0,78 m y 19,17 m, a partir del promedio, se le otorga un índice de 5.

Recarga neta

Se distinguen dos situaciones: **(1)** cuando la Formación Libertad se encuentra aflorando, debido a su carácter de acuicludo, se le otorga un índice de 1; y **(2)** a partir del balance hídrico calculado para el área de estudio se estimó un valor de infiltración de 192,1 mm/año, cuando la Formación Raigón y los cuerpos graníticos se encuentran aflorando, se le asigna un índice de 8.

Litología del acuífero: el acuífero fracturado se encuentra constituido por granitos pertenecientes al Basamento Cristalino, por lo tanto, se le asigna un índice de 4, siendo constante para la totalidad del área de estudio.

Tipo de suelo

En el área se distinguen dos unidades de suelo: **(1)** Unidad Ecilda Paullier – Las Brujas: tiene como material generador sedimentos limo-arcillosos hasta areno-arcillosos, vinculados a la Formación Libertad y en menor medida a la Formación Fray Bentos (MGAP, 2002); y **(2)** Unidad Kiyú: se genera a partir de sedimentos limo-arcillosos hasta areno-gravillosos asociados a las formaciones Dolores y Raigón (MGAP, 2002). Dado que ambas unidades de suelo se encuentran constituidas mayormente por sedimentos limo-arcillosos, se les asigna un índice de 7.

Topografía: la unidad Ecilda Paullier – Las Brujas presenta pendiente de 3%, asignándosele índice de 9 y la unidad Kiyú presenta pendiente de 1%, otorgándole índice de 10.

Naturaleza de la sección no saturada

En función de la geología, la cobertura del sistema acuífero fracturado se constituye mayormente por areniscas de granulometría variable, conglomerados y niveles de arcillas correspondientes a la Formación Raigón, y principalmente por lodolitas y loess correspondientes a la Formación Libertad. Se distinguen tres situaciones: **(1)** cuando la cobertura del acuífero se constituye por los sedimentos de la Formación Libertad, se le asigna un índice de 3; **(2)** cuando la cobertura del acuífero se constituye por los sedimentos de la Formación Raigón, se le asigna un índice de 6; y **(3)** cuando la cobertura del acuífero se constituye por los propios cuerpos graníticos se le otorga un índice de 4.

Conductividad hidráulica del acuífero: en función de los cuerpos graníticos se estima un índice de 2.

Tabla 14. Cálculo de la vulnerabilidad del acuífero fracturado mediante la aplicación del método DRASTIC.

		Formación Libertad		Formación Raigón		Granito	
D		7		7		5	
R		1		8		8	
A		4		4		4	
S		7		7		7	
T		9	10	9	10	9	10
I		3		6		4	
C		2		2		2	
INDICE	GENERAL	95	96	138	139	118	119
	PESTICIDA	129	132	169	172	151	154
VULNERABILIDAD	GENERAL	BAJA		MODERADA		MODERADA	
	PESTICIDA	MODERADA		ALTA		MODERADA	

10.4.2.2 Aplicación del método DRASTIC para el acuífero sedimentario

Profundidad del agua subterránea

La profundidad del nivel de agua medida en los pozos varía entre 1,69 a 19,77 m, distinguiéndose dos situaciones: **(1)** cuando el acuífero es semiconfinado, el nivel de agua en los pozos oscila entre 1,69 a 19,77 m, en función de la cantidad de pozos que se encuentran en el rango de 4,6 – 9,1 m, se le asigna un índice de 7; y **(2)** cuando el acuífero es no confinado, el nivel de agua en el pozo es de 5,19 m, y se le asigna un índice de 7.

Recarga neta

Se distinguen dos situaciones: **(1)** cuando la Formación Libertad se encuentra aflorando, debido a su carácter de acuícludo, se le otorga un índice de 1; y **(2)** a partir del balance hídrico calculado para el área de estudio se estimó un valor de infiltración de 192,1 mm/año, cuando la Formación Raigón se encuentra aflorando, se le asigna un índice de 8.

Litología del acuífero: la Formación Raigón se encuentra constituida mayormente por areniscas de granulometría variable, conglomerados y niveles de arcillas, se le asigna un índice de 6, siendo constante para la totalidad del área de estudio.

Tipo de suelo

En el área se distinguen dos unidades de suelo: **(1)** Unidad Ecilda Paullier – Las Brujas: tiene como material generador sedimentos limo-arcillosos hasta areno-arcillosos, vinculados a la Formación Libertad y en menor medida a la Formación Fray Bentos (MGAP, 2002); y **(2)** Unidad Kiyú: se genera a partir de sedimentos limo-arcillosos hasta areno-gravillosos asociados a las formaciones Dolores y Raigón (MGAP, 2002). Dado que ambas unidades de suelo se encuentran constituidas mayormente por sedimentos limo-arcillosos, se les asigna un índice de 7.

Topografía: la unidad Ecilda Paullier – Las Brujas presenta pendiente de 3%, asignándosele índice de 9 y la unidad Kiyú presenta pendiente de 1%, otorgándole índice de 10.

Naturaleza de la sección no saturada

Se distinguen en el área de estudio dos situaciones: **(1)** cuando la cobertura del acuífero se constituye principalmente por lodolitas y loess correspondientes a la Formación Libertad, se le asigna un índice de 3; y **(2)** cuando la cobertura del acuífero se constituye mayormente por areniscas de granulometría variable, conglomerados y niveles de arcillas correspondientes a la Formación Raigón, se le otorga un índice de 6.

Conductividad hidráulica del acuífero: dada la litología de la Formación Raigón se estima un índice de 2.

Tabla 15. Cálculo de la vulnerabilidad del acuífero sedimentario mediante la aplicación del método DRASTIC.

		Formación Libertad		Formación Raigón	
D		7		7	
R		1		8	
A		6		6	
S		7		7	
T		9	10	9	10
I		3		6	
C		2		2	
INDICE	GENERAL	101	102	144	145
	PESTICIDA	135	138	175	178
VULNERABILIDAD	GENERAL	BAJA		MODERADA	
	PESTICIDA	MODERADA		ALTA	

10.4.2.3 Mapa de vulnerabilidad DRASTIC general

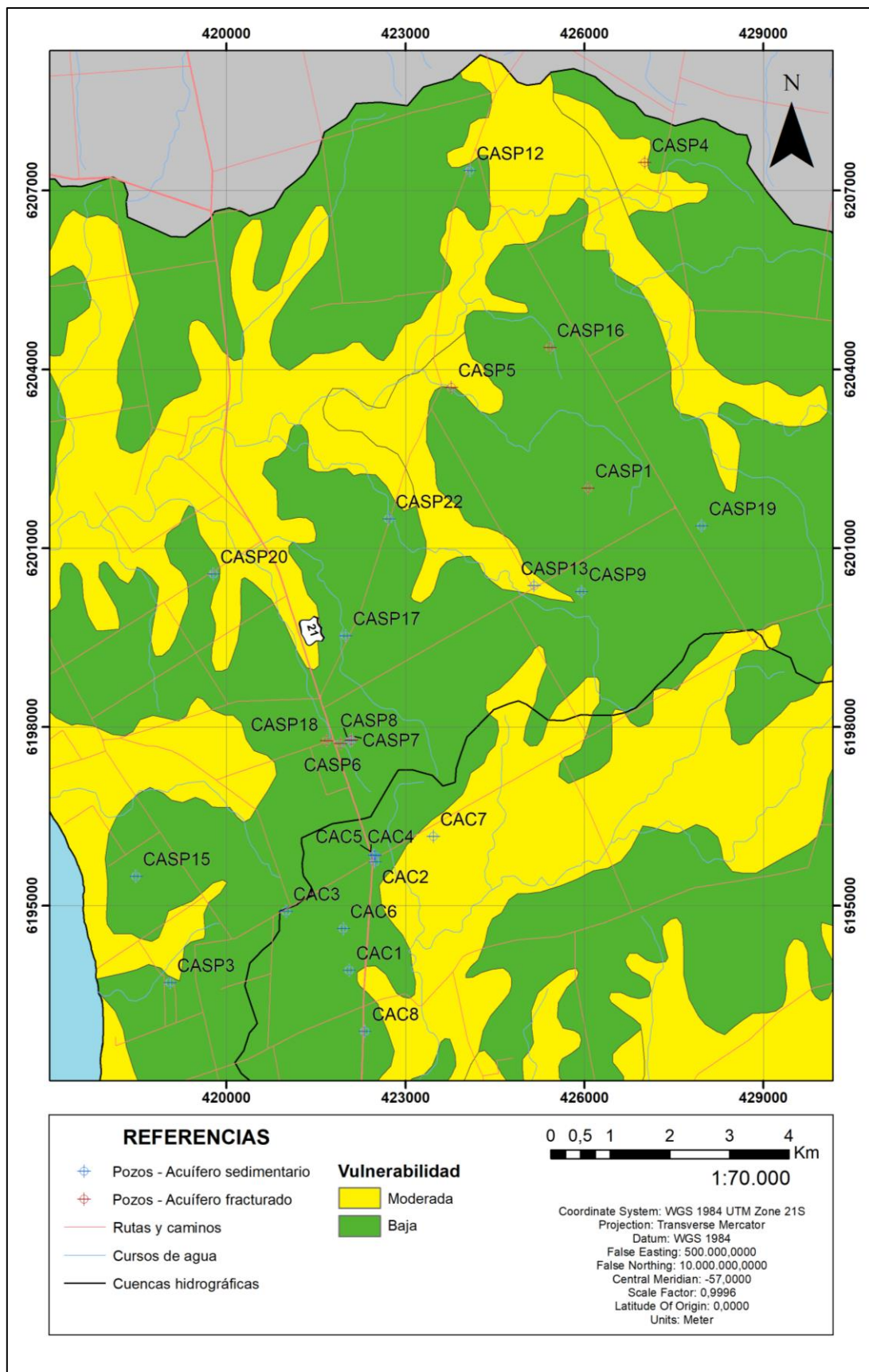


Figura 44. Mapa de vulnerabilidad mediante la aplicación del método DRASTIC general (San Pedro, Colombia).

10.4.2.4 Mapa de vulnerabilidad DRASTIC pesticida

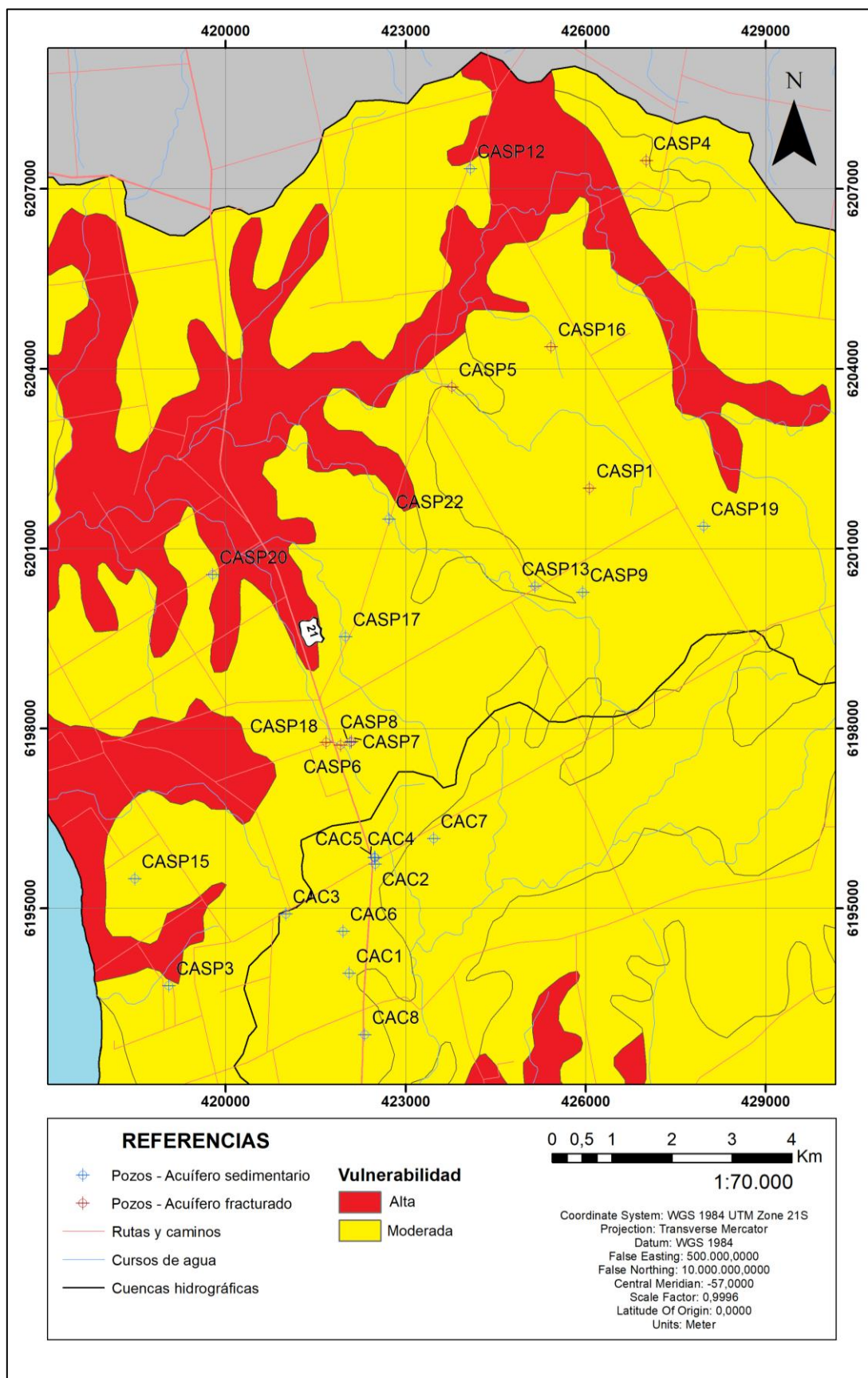


Figura 45. Mapa de vulnerabilidad mediante la aplicación del método DRASTIC pesticida (San Pedro, Colombia).

10.5 Riesgo a la contaminación

Foster (1987) señala que la interacción entre la carga contaminante y la vulnerabilidad del acuífero determina el riesgo de que la contaminación alcance al acuífero. El término carga contaminante se refiere a las actividades humanas que generan ciertas sustancias capaces de incorporarse al acuífero y alterar la calidad del agua subterránea. Se puede obtener una alta vulnerabilidad sin riesgo de contaminación, debido a la ausencia de una carga significativa de contaminantes, y viceversa (Foster & Hirata, 1991). Foster & Hirata (1991) definen el riesgo de contaminación como “la probabilidad de que las aguas subterráneas se contaminen con concentraciones por encima de los valores recomendados por la OMS para la calidad de agua de consumo humano”.

Según Foster & Hirata (1991) las fuentes de contaminación se clasifican en puntuales y dispersas. Las fuentes de contaminación puntuales son aquellas que generan una pluma de contaminación definida y concentrada, de extensión acotada y de fácil identificación, entre ellas se incluyen las actividades industriales, lagunas de efluentes, disposición de residuos sólidos y aporte de aguas superficiales contaminadas. Las fuentes de contaminación dispersas son aquellas que no generan una pluma de contaminación definida, dado que afectan un volumen significativo del acuífero y generalmente se presentan en bajas concentraciones, entre ellas se incluyen áreas residenciales urbanas y uso agrícola del suelo.

Foster (1987) desde un punto de vista teórico, establece las siguientes características semi-independientes de la carga contaminante al subsuelo generada por una actividad contaminante (Foster & Hirata, 1991; Foster et al., 2003):

- **La clase de contaminante involucrado.** Definida por su tendencia hacia la degradación o transformación in situ, y su tendencia hacia el retardo con respecto al flujo de agua subterránea como resultado de procesos (intercambio de cationes, adsorción, etc).
- **La intensidad de la contaminación.** Definida por la concentración relativa de cada contaminante involucrado, en relación con los valores guía recomendados por la OMS para la calidad de agua potable, y por la proporción de la recarga del acuífero involucrada en el proceso de contaminación.
- **El modo de disposición en el subsuelo.** Definido por la carga hidráulica asociada con la descarga del contaminante, y la profundidad bajo superficie a la que el efluente es descargado o donde ocurre la lixiviación de residuos sólidos.
- **El tiempo de aplicación de la carga contaminante.** Definida por la probabilidad de descarga del contaminante al subsuelo y el período durante el cual se aplica la carga contaminante.

Foster & Hirata (1988) clasifican las fuentes potenciales de contaminación en tres niveles cualitativos: reducido, moderado y elevado.

La determinación del riesgo a la contaminación se realizó mediante la metodología propuesta por Foster & Hirata (1988), definida como la interacción entre la intensidad de la carga contaminante antrópica y la vulnerabilidad del acuífero, presentada en la Tabla 16.

Tabla 16. Definición cualitativa del riesgo a la contaminación del agua subterránea a partir de índices de vulnerabilidad y carga potencial contaminante según Foster & Hirata (1988).

		Vulnerabilidad natural		
		Baja	Moderada	Alta
Carga potencial contaminante	Reducida	Bajo	Bajo	Moderado
	Moderada	Moderado	Moderado	Alto
	Elevada	Moderado	Alto	Alto

La determinación del riesgo a la contaminación de los acuíferos en el área de estudio se realizó a partir de la identificación de las principales fuentes de contaminación potenciales, dentro de las cuales se distinguen áreas cultivadas con uso de agroquímicos, tambos, pozos sépticos, estación de servicio, canteras artesanales y vertedero municipal (Fig. 46). Siendo la primera una fuente de contaminación dispersa, mientras que las restantes constituyen fuentes de contaminación puntuales.

- En gran parte del área de estudio se desarrollan actividades agrícolas capaces de afectar la calidad del agua subterránea, producto de la utilización de herbicidas, afectando la salud humana y animal, debido a ello representa una fuente potencial de contaminación elevada.
- Los efluentes procedentes de los tambos y las heces del ganado constituyen una fuente de contaminación por nitratos que pueden infiltrar y alcanzar las aguas subterráneas, lo que conlleva problemas a la salud humana y animal, representando una fuente potencial de contaminación elevada.
- En el Departamento de Colonia las únicas regiones que presentan saneamiento son Colonia del Sacramento, Carmelo, Florencio Sánchez y Rosario. En el área de estudio los pozos sépticos de las viviendas constituyen fuentes de contaminación por nitratos al agua subterránea provocando toxicidad aguda en humanos y animales, a su vez, la ingestión de agua contaminada por coliformes aumenta el riesgo de contraer enfermedades en humanos. Por tanto, constituye una fuente potencial de contaminación elevada.
- El área de estudio presenta una estación de servicio, la contaminación de las aguas subterráneas por hidrocarburos depende de los materiales que constituyen el subsuelo y de las propiedades del hidrocarburo. La mayoría de los componentes naturales y derivados de los hidrocarburos son altamente tóxicos, incluso a bajas concentraciones, debido a ello es una fuente potencial de contaminación elevada.

- El impacto de las actividades de las canteras artesanales, tales como excavaciones, perforaciones, derrames de hidrocarburos y vías de transporte representan una fuente potencial de contaminación moderada a alta.
- El área de estudio presenta un vertedero municipal en donde la infiltración de lixiviados puede alcanzar el agua subterránea y provocar alta toxicidad, por lo cual es una fuente potencial de contaminación elevada.

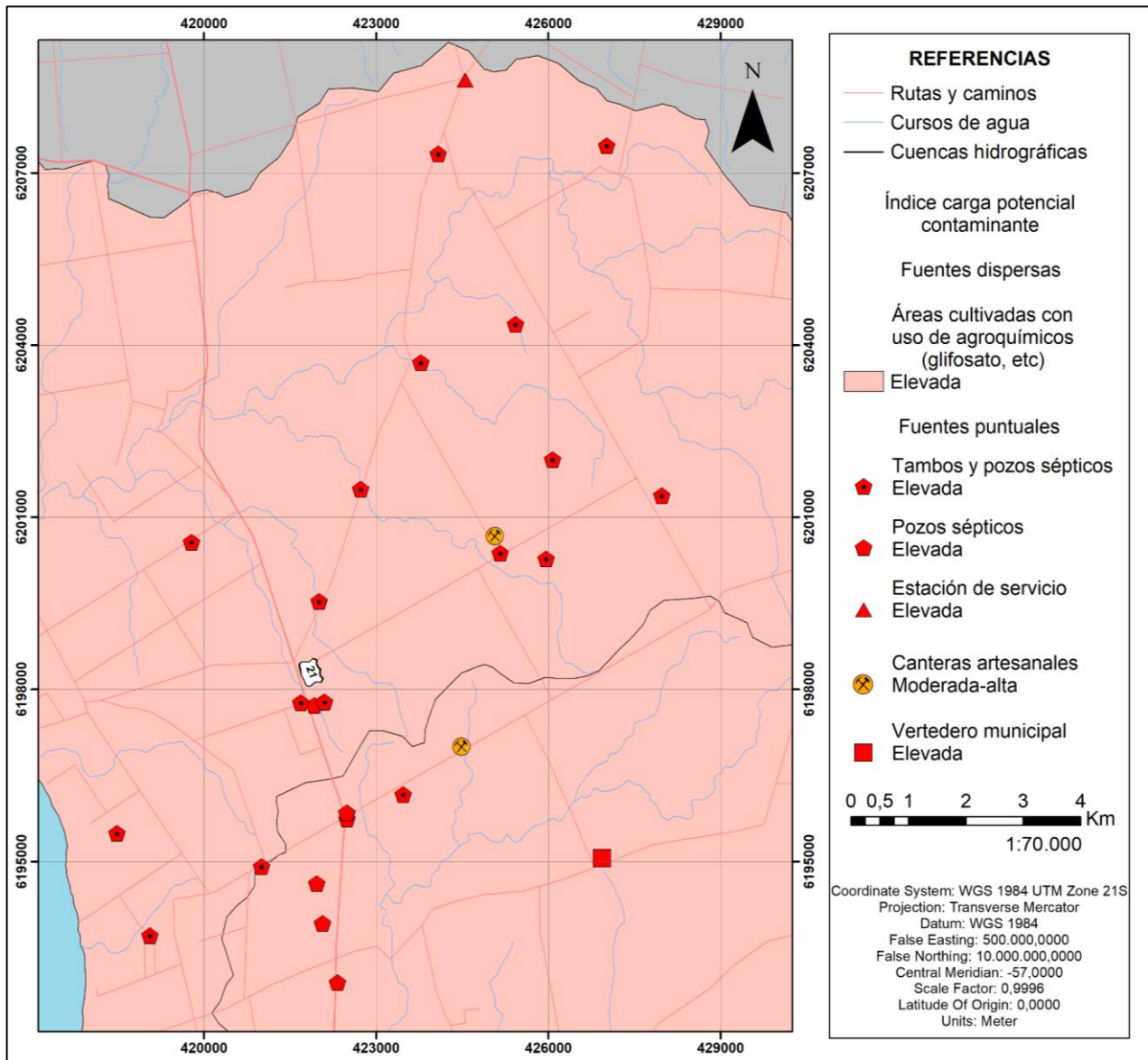


Figura 46. Mapa de ubicación de fuentes puntuales y dispersas (San Pedro, Colonia).

Se realizó el mapa de riesgo a la contaminación a partir de las cargas potenciales contaminantes y el mapa de vulnerabilidad aplicado al método DRASTIC pesticida, en función de las características del área de estudio (zonas cultivadas) (Fig. 47).

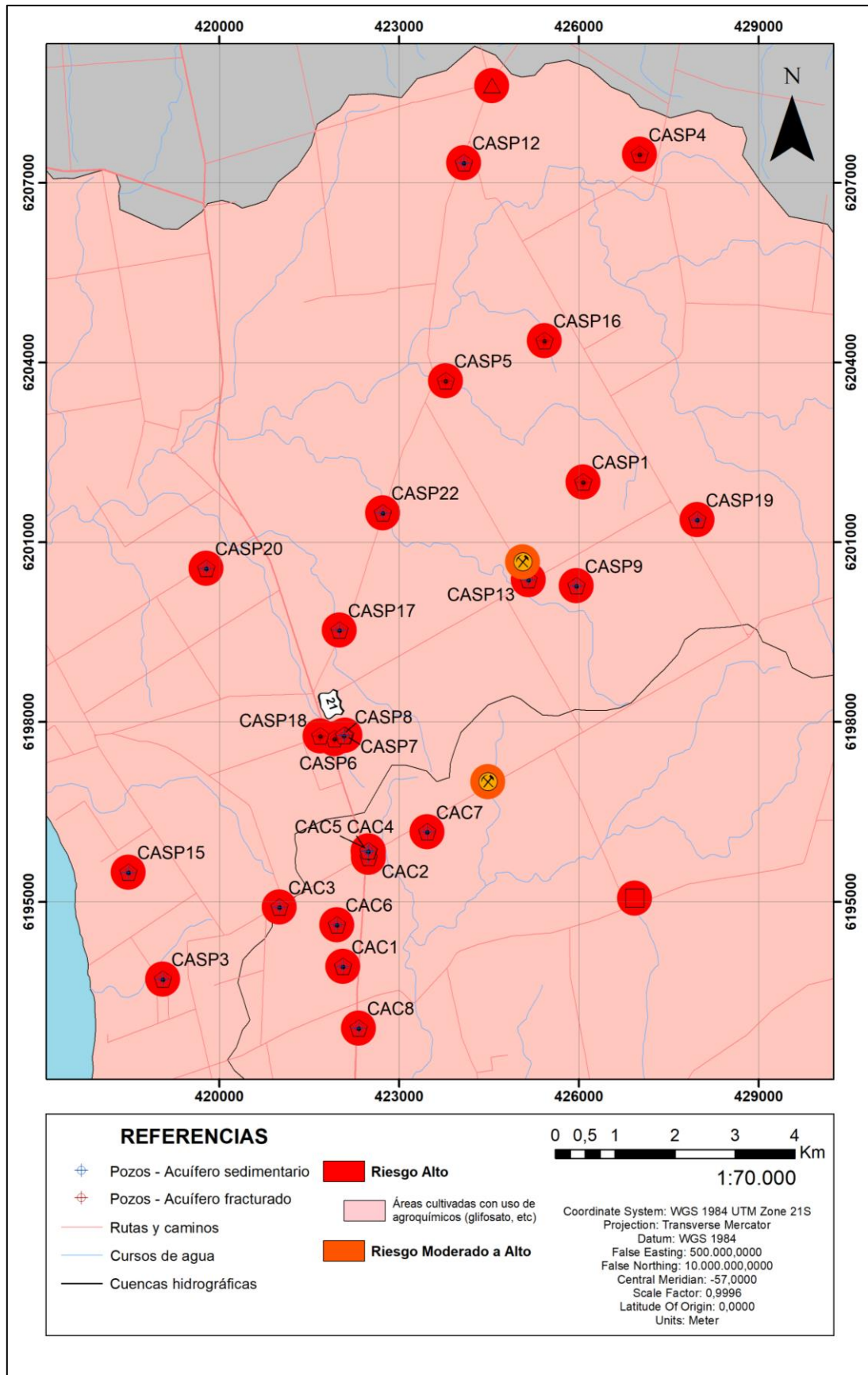


Figura 47. Mapa de riesgo según método DRASTIC pesticida (San Pedro, Colonia).

Tabla 17. Riesgo a la contaminación de las aguas subterráneas.

			Vulnerabilidad	
			Moderada	Alta
Carga potencial contaminante	Áreas cultivadas con uso de agroquímicos (glifosato, etc)	Elevada	Alto	Alto
	Tambos	Elevada	Alto	Alto
	Pozos sépticos	Elevada	Alto	Alto
	Estaciones de servicio	Elevada		Alto
	Canteras artesanales	Moderada-Alta	Moderado a alto	
	Vertedero municipal	Elevada	Alto	

11. CONCLUSIÓN

Balance hídrico

El balance hídrico edáfico calculado en el área de estudio para el período 2011 – 2021, de acuerdo a la metodología de Thornthwaite y Mather (1957), muestra que el 66% de la precipitación se evapotranspira y el 34% corresponde al exceso. Según lo propuesto por Thornthwaite, a partir del exceso se estima un 17% de escorrentía y un 17% de infiltración.

Unidades acuíferas

Se reconocieron dos unidades acuíferas: a) granitos pertenecientes al Basamento Cristalino, con extensión en toda el área de estudio, aflorando en el Este, con comportamiento de acuífero libre, mientras que son cubiertos al Norte y Oeste por las formaciones Raigón y Libertad, presentando un comportamiento de acuífero de tipo confinado a semiconfinado; y b) Formación Raigón, constituyendo el acuífero sedimentario más importante y abarcando la mayor parte del área de estudio, suprayace los granitos correspondientes al Basamento Cristalino, aflorando a lo largo de la costa y en los márgenes del Arroyo San Pedro, presentando un comportamiento de acuífero libre, mientras que en gran parte del área de estudio es cubierto por la Formación Libertad, presentando un comportamiento de acuífero semiconfinado.

Acuífero fracturado

- La piezometría muestra que el flujo del agua subterránea presenta dirección SE – NW. Se observa una zona de recarga en el sector centro-Este, con cota de isopieza de 45 m, presentando gradientes hidráulicos de 0,004 y 0,005. Se observa zonas de descarga en el sector centro-Oeste, con gradientes hidráulicos de 0,005 y 0,007, y en el sector Suroeste con gradiente hidráulico de 0,009 asociadas a la existencia de bombes.
- A partir del análisis de los datos de los parámetros fisicoquímicos medidos, los valores son normales para aguas subterráneas, a excepción de dos muestras que presentan valores de turbidez (pozos *CASP27* y *CAC9*) que superan el valor máximo permitido según la Norma UNIT 833:2008. La mayoría de las muestras presentan valores de dureza total que superan 180 mg CaCO₃/L, lo que las clasifica como aguas muy duras.
- Del análisis de los resultados de los análisis químicos, los valores son normales para aguas subterráneas, a excepción de una muestra que presenta concentración de nitratos (pozo *CASP25*) que supera el valor máximo permitido según la Norma UNIT 833:2008, esto puede sugerir contaminación derivada del empleo de herbicidas o vinculado a la cercanía de pozos sépticos. Además, una muestra presenta concentración de arsénico total (pozo *CASP4*) que supera el valor máximo permitido

según la Norma UNIT 833:2008, y sólo una muestra (pozo *CASP5*) se encuentra por debajo del valor sugerido según la OMS (2021).

- El agua subterránea se clasifica principalmente como bicarbonatada sódica y bicarbonatada cálcica. Los iones predominantes son el sodio entre los cationes, el cual indica aguas de larga residencia y bicarbonato entre los aniones.
- Del análisis del diagrama RAS la mayoría de las muestras de agua se clasifican como C3-S1, siendo de alta salinidad y bajo contenido en sodio, utilizándose el agua para riego en suelos con buen drenaje y en cultivos que sean muy tolerantes a la salinidad. La muestra de agua que se clasifica como C2-S1 es semejante al predominante, mientras que las muestras de agua restantes se clasifican como C3-S2, indicando aguas de alta salinidad y medio contenido en sodio. Puede existir cierto peligro de acumulación de sodio en el suelo, especialmente los arcillosos y franco-arcillosos y de baja permeabilidad. Además, se debe controlar las condiciones físicas del suelo y el nivel de sodio cambiante del suelo, aplicando técnicas correctoras necesarias.
- En función de la evaluación de la vulnerabilidad mediante la aplicación del método GOD (Foster, 1987) se identifican las siguientes zonas: la zona de vulnerabilidad moderada se da cuando afloran los cuerpos graníticos, la zona de vulnerabilidad baja es donde aflora la Formación Raigón y la zona de vulnerabilidad despreciable a baja se da cuando aflora la Formación Libertad. La evaluación de la vulnerabilidad mediante la aplicación del método DRASTIC (Aller et al., 1987) se realizó en función de si el contaminante es un pesticida o no. Mediante la aplicación del método DRASTIC general se distinguen las siguientes zonas: la zona de vulnerabilidad moderada se da cuando afloran los cuerpos graníticos y la Formación Raigón y la zona de vulnerabilidad baja es donde aflora la Formación Libertad. Para el método DRASTIC pesticida se presentan las siguientes situaciones: la zona de vulnerabilidad alta es donde aflora la Formación Raigón y la zona de vulnerabilidad moderada se da cuando afloran los cuerpos graníticos y la Formación Libertad.

Acuífero sedimentario

- La piezometría muestra que el flujo del agua subterránea presenta dirección general SE – NW en el Norte y NE – SW en el Sur. Se observa una zona de recarga en el sector Este, con cota de isopieza de 52 m, con un gradiente hidráulico de 0,004. Se observa zonas de descarga en el sector Oeste, con cota de isopieza de 12 m, presentando gradientes hidráulicos de 0,003 y 0,005, y en el sector Sur con gradientes hidráulicos de 0,013 y 0,020.
- A partir del análisis de los datos de los parámetros fisicoquímicos medidos, los valores son normales para aguas subterráneas, a excepción de dos muestras que presentan valores de turbidez (pozos *CASP13* y *CAC2*) y una muestra que presentan valor de conductividad eléctrica (pozo *CASP9*), sólidos totales disueltos (pozo *CASP9*) y

dureza total (pozo CAC6) que superan el valor máximo permitido según la Norma UNIT 833:2008. La mayoría de las muestras presentan valores de dureza total que superan 180 mg CaCO₃/L, lo que las clasifica como aguas muy duras.

- Del análisis de los resultados de los análisis químicos, los valores son normales para aguas subterráneas, a excepción de dos muestras que presentan concentraciones de nitratos (pozos CAC1 y CAC6) que superan el valor máximo permitido según la Norma UNIT 833:2008, esto puede sugerir contaminación derivada del empleo de herbicidas, vinculado a la cercanía de pozos sépticos o a la influencia de heces del ganado. Además, 8 muestras presentan concentraciones de arsénico total que superan el valor máximo permitido según la Norma UNIT 833:2008, y sólo dos muestras (pozos CASP12 y CASP17) se encuentran por debajo del valor sugerido según la OMS (2021).
- El agua subterránea se clasifica principalmente como bicarbonatada sódica y bicarbonatada cálcica. Los iones predominantes son el sodio entre los cationes, el cual indica aguas de larga residencia y bicarbonato entre los aniones.
- Del análisis del diagrama RAS la mayoría de las muestras de agua se clasifican como C3-S1 y C2-S1, siendo de alta a media salinidad y bajo contenido en sodio, utilizándose el agua para riego en suelos con buen drenaje y en cultivos que sean muy tolerantes a la salinidad. Las dos muestras de agua restantes se clasifican como C3-S2 y C3-S3, presentando alta salinidad y medio a alto contenido en sodio. Ambas muestras comparten características semejantes al predominante, aunque en el segundo caso existe gran peligro de acumulación de sodio en el suelo. Para corregir el posible exceso de sodio del suelo se aconseja el aporte de materia orgánica y la utilización de yeso.
- En función de la evaluación de la vulnerabilidad mediante la aplicación del método GOD (Foster, 1987) se identifica una zona de vulnerabilidad moderada cuando aflora la Formación Raigón y una zona de vulnerabilidad baja donde aflora la Formación Libertad. La evaluación de la vulnerabilidad mediante la aplicación del método DRASTIC (Aller et al., 1987) se realizó en función de si el contaminante es un pesticida o no. Mediante la aplicación del método DRASTIC general, se distingue una zona de vulnerabilidad moderada donde aflora la Formación Raigón y una zona de vulnerabilidad baja donde aflora la Formación Libertad. Para el método DRASTIC pesticida se distingue una zona de vulnerabilidad alta cuando aflora la Formación Raigón y una zona de vulnerabilidad moderada donde aflora la Formación Libertad.

Comparación de aplicación de métodos GOD y DRASTIC

En relación a los resultados obtenidos de la evaluación de la vulnerabilidad mediante la aplicación de ambas metodologías, se observa que para una etapa de estudio preliminar, la metodología GOD presenta mayor efectividad y rapidez en los resultados al tener menor cantidad de parámetros. Cuando crece la cantidad de información, en estudios de mayor detalle, se logra una mejor definición con la aplicación de la metodología DRASTIC.

Riesgo a la contaminación

Se realizó el mapa de riesgo a la contaminación a partir de las cargas potenciales contaminantes y el mapa de vulnerabilidad aplicado al método DRASTIC pesticida, en función de las características del área de estudio (zonas cultivadas).

- La zona de riesgo alto ocurre donde la vulnerabilidad es moderada y alta, dada por una contaminación difusa producida por actividades agrícolas, donde se presentan áreas cultivadas con uso de agroquímicos, y contaminación puntual generada por efluentes de tambos, pozos sépticos, estación de servicio y vertedero municipal, con una carga potencial contaminante elevada.
- La zona de riesgo moderado a alto ocurre donde la vulnerabilidad es moderada, dada por una contaminación puntual generada por la actividad en canteras artesanales, con una carga potencial contaminante moderada a alta.

12. BIBLIOGRAFÍA

- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J. H., Petty, R. H. & Hackett, G. (1987). *DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeologic Setting*. USEPA Report 600/2-87/035, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Ada, 252 pp.
- Altamirano, A., Da Silva, H., Durán, A., Echevarría, A., Panario, D. & Puentes, R. (1976). *Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay*. Ministerio de Agricultura y Pesca, Dirección de Suelos y Fertilizantes, Montevideo, Uruguay.
- APHA, American Public Health Association; AWWA, American Water Works Association & WPCF, Water Pollution Control Federation. (1998). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 20th Edition. American Public Health Association, Washington, DC.
- APHA, American Public Health Association; AWWA, American Water Works Association & WPCF, Water Pollution Control Federation. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 23rd Edition. American Public Health Association, Washington, DC.
- Bossi, J., Preciozzi, F. & Campal, N. (1993). *Predevoniano del Uruguay. Parte I: Terreno Piedra Alta*. DINAMIGE, Montevideo, pp. 1-50.
- Bossi, J. & Ferrando, L. (2001). *Carta Geológica del Uruguay a escala 1/500.000*, versión digital 2.0. Facultad de Agronomía, Montevideo.
- Bossi, J. & Ortíz, A. (2007). Estudio de la génesis del material madre de un vertisol en la unidad "La Carolina": Incidencia de las anfibolitas en el proceso propuesto. *Agrociencia Uruguay*, 11(2), 58-71.
- Bossi, J. & Gaucher, C. (2014). Estratigrafía del Predevónico del Uruguay. En: Bossi, J. & Gaucher, C. (Eds.), *Geología del Uruguay. Tomo 1: Predevónico*. Universidad de la República, Montevideo, pp. 19-42.
- Bossi, J. & Piñeyro, D. (2014). Terreno Piedra Alta. En: Bossi, J. & Gaucher, C. (Eds.), *Geología del Uruguay. Tomo 1: Predevónico*. Universidad de la República Montevideo, pp. 43-86.
- Bossi, J., Celio, A. & Mármol, S. (2016). Formación Libertad: su reformulación. *Agrociencia, Uruguay*, 20(1), pp. 36-44.
- Caorsi, J. H. & Goñi, J. C. (1958). Geología uruguaya. *Boletín del Instituto Geológico del Uruguay*, 37: 1-73.

- Cicalese, H. (1998). *Estudio geofísico: diagnóstico para obtención de agua subterránea. Poblado San Pedro*. Informe técnico MEVIR, Colonia.
- Custodio, E. (1995). Consideraciones sobre el concepto de vulnerabilidad de los acuíferos a la polución. *II Seminario Hispano – Argentino sobre Temas Actuales de Hidrología Subterránea*. Serie Correlación Geológica 11, Univ. Nacional de Tucumán: 99-122.
- Custodio, E. y Llamas, M. R. (1983). *Hidrología subterránea*. Ed. Omega, Barcelona, 2350 pp.
- de Santa Ana, H. & Ucha, N. (1994). *Exploration perspectives and hydrocarbon potential of the Uruguay sedimentary basin*. División Investigación y Desarrollo, ANCAP. Montevideo, 98 pp.
- DIEA, Estadísticas Agropecuarias. (2015). *Regiones agropecuarias del Uruguay*. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca [MGAP], Montevideo, Uruguay.
- EPA, Environmental Protection Agency. (1991). *A review of methods for assessing the sensitivity of aquifers to pesticide contamination*. Preliminary document: 1-21. Washington DC.
- Foster, S. (1987). *Fundamental Concepts in Aquifer Vulnerability, Pollution Risk and Protection Strategy*. Proceedings and Informations/TNO Committee on Hydrological Research, 38, pp. 36-86.
- Foster, S. & Hirata, R. (1988). *Groundwater Pollution Risk Assessment: A Methodology Using Available Data*. WHO-PAHO/HPE-CEPIS Technical Manual, Lima, Perú.
- Foster, S. & Hirata, R. (1991). *Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Una metodología basada en datos existentes*. CEPIS, Lima, pp. 1-81.
- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D' Elia, M. & Paris, M. (2003). *Protección de la Calidad del Agua Subterránea. Banco Mundial. Guías para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales*. Washington: Banco Mundial, 115 pp.
- Gianotti, V. & Arrighetti, R. (2017). *Mapa geológico de las Hojas Rosario (83) y Colonia (91) a Escala 1:100.000*. Proyecto Cartografía Geocientífica del Uruguay, DINAMIGE, Montevideo, 100 pp.
- Goso, H. (1964). *Importancia del Conocimiento de la Estructura Geológica en la búsqueda de aguas subterráneas. El Nivel Arcósico Cenozoico del Departamento de San José*. Primer Seminario Hidrogeológico, Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Montevideo, pp. 123-131.

- Goso, H. (1965). *El Cenozoico en el Uruguay*. Instituto Geológico del Uruguay. Montevideo, 36 pp.
- Goso, H. (1972). *Cuaternario*. Ministerio de Agricultura y Pesca, Programa de Estudio y Levantamiento de Suelos. Montevideo, 12 pp.
- Goso, H. (1985). *El Cuaternario en el Uruguay. Estratigrafía y geología histórica*. Revista de la Sociedad Uruguaya de Geología, 2, 10-20.
- Goso, H. & Bossi, J. (1966). Cenozoico. En: Bossi, J. (Ed.), *Geología del Uruguay*. Universidad de la República, Montevideo, pp. 259-305.
- Goso Aguilar, C. & Muzio, R. (2006). Geología de la costa uruguaya y sus recursos minerales asociados. En: Menafra, R., Rodríguez-Gallego, L., Scarabino, F. & Conde, D. (Eds.), *Bases para la conservación y el manejo de la costa uruguaya*. Vida Silvestre Uruguay, Montevideo, pp. 9-20.
- Heinzen, W., Velozo, C., Carrión, R., Cardozo, L., Madracho, H. & Massa, E. (1986). *Carta Hidrogeológica del Uruguay Escala 1/2.000.000 y Memoria Explicativa*. DINAMIGE, Montevideo, Uruguay, 73 pp.
- Heinzen, W., Carrión, R., Massa, E., Pena, S. & Stapff, M. (2003). *República Oriental del Uruguay - Mapa hidrogeológico - Escala 1/1.000.000*. DINAMIGE, Montevideo, Uruguay.
- Herrero, M. A., Iramain, M. S., Korol, S., Buffoni, H., Flores, M., Pol, M. & Fortunato, M. (2002). Calidad de agua y contaminación en tambos de la cuenca lechera de Abasto Sur, Buenos Aires (Argentina). *Rev. Arg. Prod. Anim*, 22(1), 61-70.
- INIA, Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. *Banco de datos Agroclimático. Precipitación acumulada, temperatura media. Estación La Estanzuela*. Recuperado de: <<http://www.inia.uy/gras/Clima/Banco-datos-agroclimatico>>. Acceso: 01/07/22.
- Margat, J. (1968). *Vulnérabilité des nappes d'eau souterraines à la pollution. Base de la cartographie*. Doc. BRGM, 68 SLG 198 HYD. Orléans, France.
- Martínez, S. (1994). *Bioestratigrafía (invertebrados) de la Formación Camacho (Mioceno, Uruguay)*. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Argentina, 346 pp.
- Martínez, S. y Ubilla, M. (2009). El Cuaternario en Uruguay. En: G. Veroslavsky, M. Ubilla & S. Martínez (Eds.), *Cuencas Sedimentarias de Uruguay, Geología, paleontología y recursos naturales. Cenozoico*. DIRAC, Facultad de Ciencias, Montevideo, 9: 195-227.

- Martínez Alfaro, P. E., Martínez Santos, P. & Castaño Castaño, S. (2006). *Fundamentos de Hidrogeología*. Ed. Mundi-Prensa, Madrid, España, 285 pp.
- Menéndez, M. (2017). *Manual de Procedimientos Analíticos para Muestras Ambientales. 1002UY: Determinación de alcalinidad en aguas naturales, residuales, residuales tratadas y aguas de lluvia*. 3ra Edición. División Laboratorio Ambiental, Montevideo, pp. 1-6.
- MGAP, Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. (2002). *Compendio Actualizado de Información de Suelos del Uruguay a Escala 1:1.000.000*. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, Dirección de Recursos Naturales Renovables, División Suelos y Aguas, Montevideo, Uruguay.
- Montaño, J. (1999). *Caracterización y vulnerabilidad de sistemas hidrogeológicos discontinuos. Cuenca del Arroyo Carrasco – Montevideo – Uruguay*. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Argentina, 171 pp.
- Montaño, J. (2013). Caracterización de Sistemas Hidrogeológicos Discontinuos del Uruguay. En: N. González, E. E. Kruse, M. M. Trovatto & P. Laurencena, *Temas actuales de la hidrología subterránea*. La Plata: EDULP, pp. 412-417.
- Montaño, J., Gagliardi, S. & Montaño, M. (2006). Recursos hídricos subterráneos del Uruguay. *Boletín Geológico y Minero*, 117 (1): 201-222.
- Olías, M., Cerón, J. C. & Fernández, I. (2005). *Sobre la utilización de la clasificación de las aguas de riego del US Laboratory Salinity (USLS)*. *Geogaceta*, 37(3).
- OMS, Organización Mundial de la Salud. (2010). *Hardness in drinking-water: background document for development of WHO guidelines for drinking-water quality* (No. WHO/HSE/WSH/10.01/10). Organización Mundial de la Salud.
- OMS, Organización Mundial de la Salud. (2021). *A global overview of national regulations and standards for drinking-water quality*. Organización Mundial de la Salud.
- Panario, D. & Gutiérrez, O. (1999). *The continental uruguayan Cenozoic: an overview*. *Quaternary International* 62: 75-84.
- Peel, E., & Preciozzi, F. (2006). Geochronologic Synthesis of the Piedra Alta Terrane, Uruguay. In: *V South American Symposium on Isotope Geology*. Punta del Este, Uruguay, pp. 234-237.

- Perea, D. y Martínez, S. (2009). Estratigrafía del Mioceno-Pleistoceno en el litoral Sur-Oeste de Uruguay. En: G. Veroslavsky, M. Ubilla, & S. Martínez, (Eds.), *Cuencas Sedimentarias de Uruguay: Geología, paleontología y recursos naturales. Cenozoico*. DIRAC, Facultad de Ciencias, Montevideo, 5: 105-124.
- Postiglione, M., Batista, L., Costa, D., Chao, R., Gorfain, J., Ledesma, J., Pérez, F., Sordo, A., Vignale, D., Carrión, R., Masa, E., Pena, S., Stapff, M., Bico, J., Caristo, R., Decoud, P., Roma, M. T., Guerèquiz, R., Montaña, J., & Peel, E. (2009). Gestión Sostenible del Acuífero Raigón, Uruguay. En: *Estudios de Hidrología Isotópica en América Latina 2006*. IAEA, pp. 195-218.
- Preciozzi, F., Spoturno, J., Heinzen, W. & Rossi, P. (1985). *Memoria explicativa de la Carta Geológica del Uruguay a escala 1:500.000*. DINAMIGE, Montevideo, 90 pp.
- Rigola Lapeña, M. (1990). *Tratamiento de aguas industriales: aguas de proceso y residuales*. Editorial Marcombo, Colombia, 156 pp.
- Rodríguez, R., Bango, G., Flaquer, A. & Musso, M. (2017). Propiedades hidráulicas de la Fm. Libertad: Ensayos de Campo y Laboratorio. In: *Actas XX Congreso Argentino de Geología, SM Tucumán. Argentina*.
- Romero Rojas, J. A. (2005). Análisis físico del agua. En: J. A. Romero Rojas, *Calidad del agua*, Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 2: 107-116.
- SGM, Servicio Geográfico Militar. (1986). Hoja Colonia del Sacramento O27 (1:50.000). En: *Plan Cartográfico Nacional a Escala 1:50.000*. Montevideo, Uruguay.
- SGM, Servicio Geográfico Militar. (1986). Hoja La Estanzuela O26 (1:50.000). En: *Plan Cartográfico Nacional a Escala 1:50.000*. Montevideo, Uruguay.
- Spoturno, J., Oyhantçabal, P., Aubet, N. & Cazaux, S. (2004). *Mapa Geológico y de Recursos Minerales del Departamento de San José a Escala 1/100.000*. DINAMIGE-CONICYT, Montevideo.
- Sprechmann, P., Martínez, S. & Gaucher, C. (1994). *Paleoecología y sedimentología de la Formación Camacho en el Departamento de Colonia (Mioceno Medio-Superior, Uruguay)*. I Jornada de Paleontología del Uruguay "Prof. Dr. Rodolfo Méndez-Alzola", Paleociencias del Uruguay, Serie didáctica, 2: 21-24.
- Stoakes, F. A., Campbell, C. V., Cass, R. & Ucha, N. (1991). Seismic stratigraphic analysis of the Punta del Este Basin, offshore Uruguay, South America. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 75 (2): 219-240.

- Suárez, D. L. (1981). Relation Between pHc and Sodium Adsorption Ratio (SAR) and an Alternative Method of Estimating SAR of Soil or Drainage Waters. *Soil Science Society of America Journal*, 45 (3): 469-475.
- Thornthwaite, C. W. (1948). An Approach Toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38(1): 55-94.
- Thornthwaite, C. W., & Mather, J. R. (1957). *Instructions and Tables for Computing Potential Evapotranspiration and the Water Balance*. Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology, (10)3: 185-311.
- Ubilla, M. & Martínez, S. (2016). *Geology and Paleontology of the Quaternary of Uruguay*. Springer Briefs in Earth System Sciences, South America and the Southern Hemisphere, pp. 1-77.
- Ugalde Peralta, R. A. (2019). *Petrografía, quimioestratigrafía y proveniencia sedimentaria de la Formación Camacho (Mioceno), Uruguay*. Tesis de maestría, Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Uruguay.
- UNIT, Instituto Uruguayo de Normas Técnicas. (2008). *Agua potable. Requisitos*. UNIT, Montevideo.
- U. S. Salinity Laboratory Staff (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. U. S. Department of Agriculture Handbook 60, Washington, DC.
- Vargas, M. C., & Tosse, O. (2010). *Propuesta Metodológica para la Evaluación de la Vulnerabilidad Intrínseca de los Acuíferos a la Contaminación*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Dirección de Ecosistemas, Grupo de Recurso Hídrico, Bogotá, Colombia.
- Vasallo, C. (2008). *Manual para el manejo de Efluentes de Tambo*. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, Uruguay, 128 pp.
- Vrba, J. & Zaporozec, A. (Ed.) (1994). *Guidebook on mapping groundwater vulnerability*. International Association of Hydrogeologists (International Contributions to Hydrogeology, 16), Verlag Heinz Heise, Hannover, 133 pp.

13. ANEXOS

Anexo I. Tablas del cálculo del balance hídrico

Tabla A 1. Balance hídrico edáfico del área de estudio.

	P (mm)	T (°C)	ETP	P - ETP	Alm	ΔAlm	ETR	E	D
Ene-11	76,4	24,0	117,4	-41,0	135,9	-30,9	107,3	0,0	10,1
Feb-11	81,3	22,5	95,0	-13,7	126,9	-9,0	90,3	0,0	4,7
Mar-11	37,2	20,8	91,9	-54,7	96,5	-30,4	67,6	0,0	24,3
Abr-11	81,4	17,6	66,8	14,6	111,1	14,6	66,8	0,0	0,0
May-11	56,7	13,1	41,7	15,0	126,1	15,0	41,7	0,0	0,0
Jun-11	92,3	10,5	27,6	64,7	190,8	64,7	27,6	0,0	0,0
Jul-11	68,8	9,5	24,1	44,7	200,0	9,2	24,1	35,5	0,0
Ago-11	13,8	10,3	27,6	-13,8	200,0	0,0	13,8	-13,8	13,8
Set-11	2,4	14,0	45,2	-42,8	163,4	-36,6	39	0,0	6,2
Oct-11	60,7	15,5	55,6	5,1	200,0	36,6	55,6	-31,5	0,0
Nov-11	66,0	20,7	88,2	-22,2	194,0	-6,0	72	0,0	16,3
Dic-11	60,2	20,6	90,4	-30,2	166,8	-27,2	87,4	0,0	3,0
Ene-12	38,0	23,6	113,5	-75,5	137,1	-62,9	100,9	0,0	12,6
Feb-12	180,0	23,1	102,2	77,8	200,0	62,9	102,2	14,9	0,0
Mar-12	132,6	20,0	84,8	47,8	200,0	0,0	84,8	47,8	0,0
Abr-12	53,0	16,2	56,7	-3,7	196,4	-3,6	56,6	0,0	0,0
May-12	65,4	15,6	54,8	10,6	200,0	3,6	54,8	7,0	0,0
Jun-12	20,1	10,6	26,9	-6,8	193,3	-6,7	26,8	0,0	0,1
Jul-12	25,8	7,8	16,2	9,6	200,0	6,7	16,2	2,9	0,0
Ago-12	153,5	12,7	38,2	115,3	200,0	0,0	38,2	115,3	0,0
Set-12	165,9	13,8	42,8	123,1	200,0	0,0	42,8	123,1	0,0
Oct-12	219,4	16,7	61,8	157,6	200,0	0,0	61,8	157,6	0,0
Nov-12	76,8	20,8	87,9	-11,1	189,2	-10,8	87,6	0,0	0,3
Dic-12	256,9	22,7	106,0	150,9	200,0	10,8	106,0	140,1	0,0
Ene-13	47,7	23,1	110,0	-62,3	82,3	-30,1	77,8	0,0	32,2
Feb-13	88,6	22,1	92,1	-3,5	80,9	-1,4	90,0	0,0	2,1
Mar-13	62,6	18,2	73,1	-10,5	76,7	-4,1	66,7	0,0	6,4
Abr-13	64,6	17,4	65,5	-0,9	76,4	-0,4	65,0	0,0	0,6
May-13	88,0	13,5	43,9	44,1	120,5	44,1	43,9	0,0	0,0
Jun-13	2,8	10,9	29,4	-26,6	175,1	54,6	57,4	0,0	-27,9
Jul-13	40,2	10,3	27,6	12,6	187,7	12,6	27,6	0,0	0,0
Ago-13	42,9	10,2	27,2	15,7	200,0	12,3	27,2	3,4	0,0
Set-13	211,6	13,1	40,3	171,3	200,0	0,0	40,3	171,3	0,0
Oct-13	31,7	16,0	58,7	-27,0	174,8	-25,2	56,9	0,0	1,7
Nov-13	98,9	19,4	78,9	20,0	194,7	20,0	78,9	0,0	0,0
Dic-13	10,6	25,0	125,9	-115,3	112,4	-82,4	93,0	0,0	32,9
Ene-14	195,6	24,0	117,0	78,6	200,0	0,0	117,0	78,6	0,0
Feb-14	301,2	21,4	86,5	214,7	200,0	0,0	86,5	214,7	0,0
Mar-14	142,0	19,0	77,8	64,2	200,0	0,0	77,8	64,2	0,0
Abr-14	76,1	16,8	60,7	15,4	200,0	0,0	60,7	15,4	0,0
May-14	93,8	13,4	42,3	51,5	200,0	0,0	42,3	51,5	0,0
Jun-14	45,0	10,6	27,2	17,8	200,0	0,0	27,2	17,8	0,0
Jul-14	157,4	11,2	30,9	126,5	200,0	0,0	30,9	126,5	0,0
Ago-14	11,3	13,3	41,7	-30,4	171,8	-28,2	39,5	0,0	2,2
Set-14	206,2	14,6	47,5	158,7	200,0	28,2	47,5	130,5	0,0
Oct-14	382,5	18,7	75,7	306,8	200,0	0,0	75,7	306,8	0,0
Nov-14	221,0	19,3	77,4	143,6	200,0	0,0	77,4	143,6	0,0
Dic-14	98,7	21,6	97,3	1,4	200,0	0,0	97,3	1,4	0,0

Tabla A 2. Balance hídrico edáfico del área de estudio.

	P (mm)	T (°C)	ETP	P - ETP	Alm	ΔAlm	ETR	E	D
Ene-15	150,0	22,5	104,1	45,9	200,0	18,5	104,1	27,4	0,0
Feb-15	25,1	22,7	95,5	-70,4	140,6	-59,4	84,5	0,0	11,1
Mar-15	26,1	21,1	92,9	-66,8	100,7	-39,9	66,0	0,0	26,9
Abr-15	47,8	19,0	74,7	-26,9	88,0	-12,7	60,5	0,0	14,2
May-15	16,4	15,6	54,4	-38,0	72,8	-15,2	31,6	0,0	22,8
Jun-15	40,8	12,4	35,1	5,7	78,5	5,7	35,1	0,0	0,0
Jul-15	38,5	11,1	29,8	8,7	87,2	8,7	29,8	0,0	0,0
Ago-15	241,5	14,3	46,7	194,8	200,0	112,8	46,7	82,0	0,0
Set-15	31,8	12,4	35,1	-3,3	196,7	-3,3	35,1	0,0	0,0
Oct-15	84,0	14,3	46,7	37,3	200,0	3,3	46,7	34,1	0,0
Nov-15	113,4	18,4	70,6	42,8	200,0	0,0	70,6	42,8	0,0
Dic-15	83,9	22,4	103,3	-19,4	181,5	-18,5	102,4	0,0	0,9
Ene-16	42,1	23,4	112,5	-70,4	140,6	-59,4	101,5	0,0	11,1
Feb-16	144,8	24,4	113,0	31,8	172,4	31,8	113,0	0,0	0,0
Mar-16	96,9	19,5	82,5	14,4	186,8	14,4	82,5	0,0	0,0
Abr-16	340,5	16,7	61,3	279,2	200,0	13,2	61,3	266,1	0,0
May-16	31,8	11,3	32,5	-0,7	199,3	-0,7	32,5	0,0	0,0
Jun-16	21,8	9,3	22,6	-0,8	198,5	-0,8	22,6	0,0	0,0
Jul-16	156,9	10,0	26,4	130,5	200,0	1,5	26,4	129,0	0,0
Ago-16	94,3	12,5	38,6	55,7	200,0	0,0	38,6	55,7	0,0
Set-16	75,1	12,7	38,4	36,7	200,0	0,0	38,4	36,7	0,0
Oct-16	123,8	16,2	60,1	63,7	200,0	0,0	60,1	63,7	0,0
Nov-16	104,0	19,1	77,0	27,0	200,0	0,0	77,0	27,0	0,0
Dic-16	111,8	23,0	109,3	2,5	200,0	0,0	109,3	2,5	0,0
Ene-17	122,2	24,0	116,2	6,0	200,0	0,0	116,2	6,0	0,0
Feb-17	77,3	23,6	101,8	-24,5	176,9	-23,1	100,4	0,0	1,4
Mar-17	134,5	20,5	87,3	47,2	200,0	23,1	87,3	24,1	0,0
Abr-17	43,2	17,4	62,7	-19,5	181,4	-18,6	61,8	0,0	0,9
May-17	118,2	14,8	48,3	69,9	200,0	18,6	48,3	51,2	0,0
Jun-17	9,5	12,8	35,9	-26,4	175,2	-24,8	34,3	0,0	1,7
Jul-17	95,1	12,4	35,1	60,0	200,0	24,8	35,1	35,3	0,0
Ago-17	134,8	13,6	41,5	93,3	200,0	0,0	41,5	93,3	0,0
Set-17	167,5	14,6	45,6	121,9	200,0	0,0	45,6	121,9	0,0
Oct-17	121,7	16,3	57,6	64,1	200,0	0,0	57,6	64,1	0,0
Nov-17	61,2	18,3	68,8	-7,6	192,6	-7,4	68,6	0,0	0,1
Dic-17	127,8	22,3	101,7	26,1	200,0	7,4	101,7	18,7	0,0
Ene-18	153,4	23,5	112,7	40,7	200,0	0,0	112,7	40,7	0,0
Feb-18	76,1	22,7	95,8	-19,7	181,2	-18,8	94,9	0,0	0,9
Mar-18	167,8	20,1	85,8	82,0	200,0	18,8	85,8	63,2	0,0
Abr-18	133,6	20,5	85,9	47,7	200,0	0,0	85,9	47,7	0,0
May-18	138,4	15,3	53,2	85,2	200,0	0,0	53,2	85,2	0,0
Jun-18	11,5	9,8	23,6	-12,1	188,2	-11,8	23,3	0,0	0,4
Jul-18	113,5	9,5	23,1	90,4	200,0	11,8	23,1	78,6	0,0
Ago-18	82,4	10,8	28,9	53,5	200,0	0,0	28,9	53,5	0,0
Set-18	93,8	15,5	52,7	41,1	200,0	0,0	52,7	41,1	0,0
Oct-18	30,5	15,3	53,2	-22,7	178,5	-21,5	52,0	0,0	1,2
Nov-18	79,4	19,6	79,4	0,0	178,5	0,0	79,4	0,0	0,0
Dic-18	153,6	20,5	88,8	64,8	200,0	21,5	88,8	43,3	0,0

Tabla A 3. Balance hídrico edáfico del área de estudio.

	P (mm)	T (°C)	ETP	P - ETP	Alm	ΔAlm	ETR	E	D
Ene-19	146,8	23,1	109,8	37,0	181,8	37,0	109,8	0,0	0,0
Feb-19	121,3	21,9	90,4	30,9	200,0	18,2	90,4	12,7	0,0
Mar-19	93,2	19,5	81,9	11,3	200,0	0,0	81,9	11,3	0,0
Abr-19	20,8	17,5	65,8	-45,0	159,7	-40,3	61,1	0,0	4,7
May-19	95,2	14,5	49,1	46,1	200,0	40,3	49,1	5,8	0,0
Jun-19	134,6	13,5	42,0	92,6	200,0	0,0	42,0	92,6	0,0
Jul-19	61,7	9,9	25,4	36,3	200,0	0,0	25,4	36,3	0,0
Ago-19	40,6	10,5	28,1	12,5	200,0	0,0	28,1	12,5	0,0
Set-19	65,2	12,5	36,8	28,4	200,0	0,0	36,8	28,4	0,0
Oct-19	190,3	15,8	57,0	133,3	200,0	0,0	57,0	133,3	0,0
Nov-19	42,6	20,8	88,6	-46,0	158,9	-41,1	83,7	0,0	4,9
Dic-19	81,5	21,9	100,1	-18,6	144,8	-14,1	95,6	0,0	4,5
Ene-20	76,5	22,9	108,2	-31,7	112,8	-19,4	95,9	0,0	12,3
Feb-20	69,6	22,5	98,2	-28,6	97,8	-15,0	84,6	0,0	13,6
Mar-20	62,8	22,3	103,4	-40,6	79,8	-18,0	80,8	0,0	22,6
Abr-20	121,7	16,8	61,5	60,2	140,0	60,2	61,5	0,0	0,0
May-20	8,7	14,0	46,4	-37,7	165,6	25,6	34,3	0,0	12,2
Jun-20	106,1	11,4	31,6	74,5	200,0	34,4	31,6	40,2	0,0
Jul-20	30,1	9,2	22,6	7,5	200,0	0,0	22,6	7,5	0,0
Ago-20	38,2	12,4	37,7	0,5	200,0	0,0	37,7	0,5	0,0
Set-20	63,9	12,5	37,0	26,9	200,0	0,0	37,0	26,9	0,0
Oct-20	91,7	15,4	54,7	37,0	200,0	0,0	54,7	37,0	0,0
Nov-20	31,1	19,4	78,7	-47,6	157,6	-42,4	73,5	0,0	5,2
Dic-20	62,7	21,6	97,9	-35,2	132,2	-25,4	88,1	0,0	9,8
Ene-21	174,7	23,1	109,8	64,9	200,0	62,4	109,8	2,5	0,0
Feb-21	115,2	21,5	87,6	27,6	200,0	0,0	87,6	27,6	0,0
Mar-21	109,3	20,3	87,9	21,4	200,0	0,0	87,9	21,4	0,0
Abr-21	88,7	18,7	73,8	14,9	200,0	0,0	73,8	14,9	0,0
May-21	114,8	12,5	38,1	76,7	200,0	0,0	38,1	76,7	0,0
Jun-21	50,2	10,7	28,2	22,0	200,0	0,0	28,2	22,0	0,0
Jul-21	64,0	10,7	29,1	34,9	200,0	0,0	29,1	34,9	0,0
Ago-21	58,1	11,3	32,0	26,1	200,0	0,0	32,0	26,1	0,0
Set-21	152,6	13,9	44,3	108,3	200,0	0,0	44,3	108,3	0,0
Oct-21	23,1	16,5	61,5	-38,4	165,1	-34,9	58,0	0,0	3,5
Nov-21	145,1	19,6	80,0	65,1	200,0	34,9	80,0	30,2	0,0
Dic-21	28,5	22,3	103,3	-74,8	137,6	-62,4	90,9	0,0	12,4

Anexo II. Censo de pozos

Tabla A 4. Censo de pozos. Acuífero fracturado.

Código	X	Y	Z (m)	Nivel estático (m)	Profundidad total de pozo (m)	Caudal (m ³ /h)	Usos
CAC9	425797,4	6194806,16	46	Sellado	-	-	D
CASP1	426065,23	6202010,33	46	1,31	40,0	12,0	D, T
CASP4	427011,41	6207479,6	52	19,17	48,0	5,5	T
CASP5	423772,95	6203700,63	22	0,78	40,0	10,0	D, T
CASP6	421917,95	6197724,96	31	2,22	20,0	5,0	R
CASP7	422098,57	6197786,54	38	7,23	40,0	4,0	D
CASP14	430148,05	6201090,81	68	Sellado	34,0	10,0	D, T
CASP16	425422,53	6204371,29	41	6,98	32,0	6,5	D, T
CASP18	421678,44	6197772,55	34	9,87	28,0	12,0	D, T
CASP25	426346,33	6209162,44	47	Sellado	-	3,0	D
CASP27	421851,25	6198399,64	38	Sellado	-	-	D

*D: doméstico, T: tambo, R: riego

Tabla A 5. Censo de pozos. Acuífero sedimentario.

Código	X	Y	Z (m)	Tipo de pozo	Nivel estático (m)	Profundidad total de pozo (m)	Caudal (m ³ /h)	Usos
CAC1	422058,56	6193922,37	39	Brocal	19,77	27,36	-	D
CAC2	422487,51	6195742,2	45	Brocal	7,73	-	-	D
CAC3	421002,17	6194911,56	26	Surgente	8,67	-	-	D, T
CAC4	422489,68	6195849,41	49	Surgente	9,28	27,0	1,8	D
CAC5	422478,68	6195852,1	49	Brocal	9,49	12,54	-	D
CAC6	421958,23	6194620,8	29	Brocal	7,83	12,53	-	D
CAC7	423467,58	6196170,77	59	Brocal	16,53	21,02	-	D, T
CAC8	422321,22	6192893,22	16	Brocal	1,69	3,90	-	D
CASP2	419897,65	6204531,08	60	Surgente	Sellado	-	-	D, T
CASP3	419052,98	6193711,31	29	Brocal	5,53	6,97	2,0	D,T
CASP8	422078,21	6197776,82	21	Brocal	6,30	11,22	-	D
CASP9	425953,48	6200276,4	37	Brocal	12,26	14,51	0,7	D,T
CASP10	419092,88	6195940,71	17	Surgente	Sellado	31,0	-	D,T
CASP11	420706,36	6206000,56	22	Surgente	Sellado	18,0	5,0	D,T
CASP12	424076,26	6207340,14	61	Brocal	12,16	14,04	-	D,T
CASP13	425157,18	6200379,1	32	Brocal	9,10	13,36	-	D,T
CASP15	418481,97	6195496,42	39	Surgente	9,50	34,0	3,6	D,T
CASP17	422001,17	6199537,59	43	Brocal	3,86	5,84	-	T
CASP19	427970,06	6201379,24	53	Surgente	8,15	37,0	3,0	D,T
CASP20	419781,06	6200570,77	25	Surgente	5,19	32,0	6,0	D,T
CASP21	419040,67	6196571,15	23	Surgente	Sellado	15,0	-	D,T
CASP22	422722,13	6201496,89	29	Surgente	2,64	32,0	-	D,T
CASP23	423516,59	6204415,66	24	Surgente	Sellado	26,0	2,5	D,T
CASP24	419809,51	6197762,85	31	Surgente	Sellado	18,0	-	D,T
CASP26	421837,24	6197906,04	33	Brocal	-	-	-	D,T

*D: doméstico, T: tambo.

Anexo III. Resultados de parámetros fisicoquímicos

Tabla A 6. Resultados de parámetros fisicoquímicos. Acuífero fracturado.

Código	pH	Eh (mV)	Oxígeno disuelto (ppm)	Conductividad eléctrica (µS/cm)	Sólidos totales disueltos (ppm)	Turbidez (FNU)	Temperatura (°C)
CAC9	7,29	143,7	3,52	1338	669	1,6	14,18
CASP1	7,13	214,4	5,01	870	435	0,4	18,58
CASP4	7,40	180,5	4,75	929	466	0,4	14,64
CASP5	6,91	215,1	3,67	764	382	0,1	19,03
CASP6	7,19	190,8	3,19	829	414	1,0	18,89
CASP14	7,30	224,6	4,47	691	346	0,1	16,31
CASP16	7,36	207,1	5,10	831	416	0	17,88
CASP18	7	210,1	3,08	880	440	0	19,01
CASP25	7,11	192,6	6,50	863	432	0,2	17,21
CASP27	7,34	140,3	2,71	1365	685	1,4	14,51

Tabla A 7. Resultados de parámetros fisicoquímicos. Acuífero sedimentario.

Código	pH	Eh (mv)	Oxígeno disuelto (ppm)	Conductividad eléctrica (µS/cm)	Sólidos totales disueltos (ppm)	Turbidez (FNU)	Temperatura (°C)
CAC1	7,48	186,9	4,76	796	398	0,4	18,76
CAC2	7,52	169,3	4,54	871	436	2,5	16,56
CAC4	7,43	165,0	3,58	867	433	0,2	18,85
CAC5	7,58	184,6	3,82	1092	546	0,2	18,1
CAC6	7,48	169,1	5,00	1181	590	0,3	15,35
CAC7	7,39	188,2	3,94	1296	648	0,3	19,36
CAC8	7,34	193,2	3,42	472	236	0,7	18,54
CASP2	7,33	205,6	3,80	575	288	0,1	18,76
CASP3	7,22	205,7	5,04	899	450	0,5	17,93
CASP8	7,35	176,5	4,54	665	333	0,1	19,16
CASP9	7,37	214,4	5,56	2346	1173	0,4	18,33
CASP10	7,13	201,3	6,14	599	299	0,8	20,29
CASP11	7,24	201	6,65	702	351	0,1	18,15
CASP12	7,11	235,9	3,31	1082	542	1,0	19,31
CASP13	7,54	194,2	5,49	945	472	1,3	18,84
CASP15	7,08	184,6	5,59	768	384	0,8	18,69
CASP17	6,85	236,5	2,69	474	238	0,2	18,1
CASP19	7,51	196,7	5,18	1030	515	0	18,95
CASP20	7,40	196,5	4,83	628	314	0,1	17,05
CASP21	7,15	195,6	5,01	695	347	0,2	19,9
CASP22	7,08	221,4	2,83	809	405	0,5	17,71
CASP23	6,98	215,4	5,63	975	487	0	19,42
CASP24	7,12	214,6	6,20	602	301	0,1	18,89

Anexo IV. Resultados de análisis químico

Tabla A 8. Resultados de análisis químico. Acuífero fracturado.

Código	CAC9	CASP1	CASP4	CASP5	CASP7	CASP14	CASP16	CASP18	CASP25	CASP27
Dureza Total [mg CaCO ₃ /L]	287	332,8	153,5	318,9	287	283	229,2	210	346,8	279
HCO ₃ ⁻ [mg/L]	530,7	470,92	531,92	387,96	498,98	545,34	524,6	520,94	540,46	314,76
Cl ⁻ [mg/L]	122,3619	19,3493	23,2541	9,9687	14,1304	9,1188	7,486	22,3993	37,0084	3,0388
NO ₃ ⁻ [mg/L]	21,5084	6,4133	44,5389	12,6993	36,4762	0,078	30,2474	0,1304	56,6389	21,3689
SO ₄ ²⁻ [mg/L]	17,5584	11,6771	23,1943	9,5051	12,0585	11,1777	10,7946	19,1833	11,3923	4,5495
Na ⁺ [mg/L]	87,5264	23,2456	69,3024	8,7214	35,8201	25,9327	16,4408	33,7331	27,5704	3,5709
K ⁺ [mg/L]	0,2891	2,2218	0,9452	13,0196	2,0431	1,6176	12,5063	2,1276	1,0849	2,8097
Mg ²⁺ [mg/L]	0,5259	6,9555	0,8564	9,4569	6,3543	5,4988	9,1402	2,3542	8,1494	2,4108
Ca ²⁺ [mg/L]	17,9955	12,7694	3,3224	6,7281	80,473	15,279	1,6108	9,3196	33,3126	12,6877
Alcalinidad [mg CaCO ₃ /L]	435	386	436	318	409	447	430	427	443	258
Arsénico total [mg/L]	0,015	0,016	0,034	0,009	0,016	0,014	0,019	0,019	0,011	0,017
As ⁵⁺ [mg/L]	0,012	0,015	0,03	*	0,013	0,011	0,017	0,015	0,009	0,014
As ³⁺ [mg/L]	0,003	0,001	0,004	*	0,003	0,002	0,002	0,004	0,003	0,003
HCO ₃ ⁻ [meq/L]	8,70	7,72	8,72	6,36	8,18	8,94	8,60	8,54	8,86	5,16
Cl ⁻ [meq/L]	3,45	0,55	0,66	0,28	0,40	0,26	0,21	0,63	1,04	0,09
NO ₃ ⁻ [meq/L]	0,35	0,10	0,72	0,20	0,59	0,00	0,49	0,00	0,91	0,34
SO ₄ ²⁻ [meq/L]	0,37	0,24	0,48	0,20	0,25	0,23	0,22	0,40	0,24	0,09
Cl ⁻ + NO ₃ ⁻ [meq/L]	3,79	0,65	1,37	0,49	0,99	0,26	0,70	0,63	1,96	0,43
∑ aniones	12,86	8,61	10,58	7,04	9,42	9,43	9,52	9,57	11,05	5,69
Na ⁺ [meq/L]	3,81	1,01	3,01	0,38	1,56	1,13	0,71	1,47	1,20	0,16
K ⁺ [meq/L]	0,01	0,06	0,02	0,33	0,05	0,04	0,32	0,05	0,03	0,07
Mg ²⁺ [meq/L]	0,04	0,57	0,07	0,78	0,53	0,45	0,76	0,19	0,67	0,20
Ca ²⁺ [meq/L]	0,90	0,64	0,17	0,34	4,02	0,76	0,08	0,47	1,67	0,63
Na ⁺ + K ⁺ [meq/L]	3,81	1,07	3,04	0,71	1,61	1,17	1,03	1,52	1,23	0,23
∑ cationes	4,76	2,28	3,27	1,83	6,16	2,39	1,87	2,18	3,57	1,06
Índice SAR	5,5	1,3	8,8	0,5	1,0	1,4	1,1	2,6	1,1	0,2
Error (%)	-46,00	-58,12	-58,72	-58,75	-20,92	-59,60	-67,17	-62,88	-51,22	-68,55

*Muestra con niveles bajos de Arsénico total por lo que no se le realizó la especiación.

Tabla A 9. Resultados de análisis químico. Acuífero sedimentario.

Código	CAC1	CAC2	CAC3	CAC4	CAC6	CAC7	CAC8
Dureza Total [mg CaCO₃/L]	221,2	209,3	271	177,4	613,8	181,4	261,1
HCO₃⁻ [mg/L]	552,66	671	309,88	588,04	549	677,1	367,22
Cl⁻ [mg/L]	29,782	45,1622	11,2047	66,2156	107,7378	45,0501	6,1998
NO₃⁻ [mg/L]	60,5547	23,8793	9,5076	0,1254	192,6781	47,7506	13,211
SO₄²⁻ [mg/L]	22,6948	23,0566	9,2158	27,2114	73,9157	40,4666	9,3057
Na⁺ [mg/L]	72,939	80,4547	7,0002	30,1274	35,1252	94,944	14,9402
K⁺ [mg/L]	2,9267	1,1986	14,0325	13,8217	6,4023	0,5229	4,0278
Mg²⁺ [mg/L]	3,1757	2,8861	10,1916	9,1757	16,0648	0,9222	3,2233
Ca²⁺ [mg/L]	9,6613	4,3861	4,1918	1,2634	10,9569	2,4676	17,3363
Alcalinidad [mg CaCO₃/L]	453	550	254	482	450	555	301
Arsénico total [mg/L]	0,023	0,021	0,011	0,03	0,014	0,018	0,013
As⁵⁺ [mg/L]	0,018	0,017	0,009	0,024	0,012	0,014	0,011
As³⁺ [mg/L]	0,005	0,003	0,002	0,006	0,002	0,004	0,002
HCO₃⁻ [meq/L]	9,06	11,00	5,08	9,64	9,00	11,10	6,02
Cl⁻ [meq/L]	0,84	1,27	0,32	1,87	3,03	1,27	0,17
NO₃⁻ [meq/L]	0,98	0,39	0,15	0,00	3,11	0,77	0,21
SO₄²⁻ [meq/L]	0,47	0,48	0,19	0,57	1,54	0,84	0,19
Cl⁻ + NO₃⁻ [meq/L]	1,82	1,66	0,47	1,87	6,14	2,04	0,39
∑ aniones	11,35	13,14	5,74	12,07	16,68	13,98	6,60
Na⁺ [meq/L]	3,17	3,50	0,30	1,31	1,53	4,13	0,65
K⁺ [meq/L]	0,07	0,03	0,36	0,35	0,16	0,01	0,10
Mg²⁺ [meq/L]	0,26	0,24	0,84	0,76	1,33	0,08	0,27
Ca²⁺ [meq/L]	0,48	0,22	0,21	0,06	0,55	0,12	0,87
Na⁺ + K⁺ [meq/L]	3,25	3,53	0,66	1,66	1,69	4,14	0,75
∑ cationes	3,99	3,99	1,72	2,48	3,57	4,34	1,89
Índice SAR	5,2	7,3	0,4	2,0	1,6	13,1	0,9
Error (%)	-47,96	-53,44	-53,99	-65,86	-64,77	-52,62	-55,56

Tabla A 10. Resultados de análisis químico. Acuífero sedimentario (continuación).

Código	CASP2	CASP3	CASP9	CASP10	CASP11	CASP12	CASP13	CASP15
Dureza Total [mg CaCO₃/L]	237,2	312,9	312,9	179,5	243,1	269,1	223,2	253,1
HCO₃⁻ [mg/L]	405,04	529,48	553,88	433,1	418,46	387,96	620,98	359,9
Cl⁻ [mg/L]	7,0856	39,1887	ND	8,3821	7,0487	3,6785	23,5943	36,5148
NO₃⁻ [mg/L]	3,3432	11,545	ND	22,9146	6,2061	17,2841	25,7006	31,9906
SO₄²⁻ [mg/L]	10,1368	20,7174	ND	10,7583	15,9682	8,1626	39,4427	28,5169
Na⁺ [mg/L]	27,9852	37,3348	107,7754	31,3446	18,172	20,0137	35,4598	26,6857
K⁺ [mg/L]	14,0264	4,1253	0,9452	0,1689	14,9291	2,4687	14,9082	16,0384
Mg²⁺ [mg/L]	12,5409	5,9213	6,2522	19,5463	10,6838	3,6676	10,9605	12,1918
Ca²⁺ [mg/L]	13,4325	2,7989	13,3568	3,2412	6,2857	8,857	2,5931	9,1759
Alcalinidad [mg CaCO₃/L]	332	434	454	355	343	318	509	295
Arsénico total [mg/L]	0,011	0,022	0,014	0,023	0,016	0,009	0,022	0,012
As⁵⁺ [mg/L]	0,008	0,017	0,011	0,019	0,014	0,008	0,018	0,01
As³⁺ [mg/L]	0,003	0,005	0,003	0,004	0,002	0,001	0,004	0,002
HCO₃⁻ [meq/L]	6,64	8,68	9,08	7,10	6,86	6,36	10,18	5,90
Cl⁻ [meq/L]	0,20	1,10	-	0,24	0,20	0,10	0,66	1,03
NO₃⁻ [meq/L]	0,05	0,19	-	0,37	0,10	0,28	0,41	0,52
SO₄²⁻ [meq/L]	0,21	0,43	-	0,22	0,33	0,17	0,82	0,59
Cl⁻ + NO₃⁻ [meq/L]	0,25	1,29	-	0,61	0,30	0,38	1,08	1,54
∑ aniones	7,10	10,40	-	7,93	7,49	6,91	12,08	8,04
Na⁺ [meq/L]	1,22	1,62	4,69	1,36	0,79	0,87	1,54	1,16
K⁺ [meq/L]	0,36	0,11	0,02	0,00	0,38	0,06	0,38	0,41
Mg²⁺ [meq/L]	1,04	0,49	0,52	1,62	0,88	0,30	0,91	1,01
Ca²⁺ [meq/L]	0,67	0,14	0,67	0,16	0,31	0,44	0,13	0,46
Na⁺ + K⁺ [meq/L]	1,58	1,73	4,71	1,37	1,17	0,93	1,92	1,57
∑ cationes	3,28	2,36	5,89	3,14	2,37	1,68	2,96	3,04
Índice SAR	1,3	2,9	6,1	1,4	1,0	1,4	2,1	1,4
Error (%)	-36,78	-63,04	-	-43,21	-51,95	-60,91	-60,66	-45,16

ND: no detectable


Tabla A 11. Resultados de análisis químico. Acuífero sedimentario (continuación).

Código	CASP17	CASP19	CASP20	CASP21	CASP22	CASP23	CASP24	CASP26
Dureza Total [mg CaCO₃/L]	259,7	211,3	165,4	281	474,3	480,3	225,2	374,7
HCO₃⁻ [mg/L]	367,22	539,24	370,88	387,96	520,94	466,04	309,88	427
Cl⁻ [mg/L]	7,1156	40,164	10,3855	6,9419	40,9067	ND	14,5666	23,0666
NO₃⁻ [mg/L]	14,3355	18,9208	19,3179	24,6479	9,639	ND	20,1673	30,0384
SO₄²⁻ [mg/L]	6,8579	31,6574	10,9352	8,6744	26,4654	ND	15,5322	13,7125
Na⁺ [mg/L]	13,4274	63,0057	32,4134	94,6597	23,5455	15,9432	12,3549	12,2724
K⁺ [mg/L]	2,3875	15,5233	2,4167	0,02	17,3766	13,4635	13,0422	4,3202
Mg²⁺ [mg/L]	1,9205	13,1611	2,4818	0,3217	17,2907	14,2679	9,7082	6,9455
Ca²⁺ [mg/L]	19,9139	7,8744	7,1904	17,8734	32,3182	20,8699	5,0149	14,4971
Alcalinidad [mg CaCO₃/L]	301	442	304	318	427	382	254	350
Arsénico total [mg/L]	0,006	0,024	0,018	0,021	0,014	0,011	0,017	0,014
As⁵⁺ [mg/L]	*	0,02	0,015	0,019	0,009	0,008	0,015	0,011
As³⁺ [mg/L]	*	0,004	0,003	0,002	0,005	0,002	0,002	0,003
HCO₃⁻ [meq/L]	6,02	8,84	6,08	6,36	8,54	7,64	5,08	7,00
Cl⁻ [meq/L]	0,20	1,13	0,29	0,20	1,15	-	0,41	0,65
NO₃⁻ [meq/L]	0,23	0,31	0,31	0,40	0,16	-	0,33	0,48
SO₄²⁻ [meq/L]	0,14	0,66	0,23	0,18	0,55	-	0,32	0,29
Cl⁻ + NO₃⁻ [meq/L]	0,43	1,44	0,60	0,59	1,31	-	0,74	1,13
∑ aniones	6,59	10,94	6,91	7,13	10,40	-	6,14	8,42
Na⁺ [meq/L]	0,58	2,74	1,41	4,12	1,02	0,69	0,54	0,53
K⁺ [meq/L]	0,06	0,40	0,06	0,00	0,44	0,34	0,33	0,11
Mg²⁺ [meq/L]	0,16	1,09	0,21	0,03	1,43	1,18	0,80	0,57
Ca²⁺ [meq/L]	1,00	0,39	0,36	0,89	1,62	1,04	0,25	0,72
Na⁺ + K⁺ [meq/L]	0,64	3,14	1,47	4,12	1,47	1,04	0,87	0,64
∑ cationes	1,80	4,62	2,04	5,04	4,51	3,26	1,92	1,94
Índice SAR	0,8	3,2	2,7	6,1	0,8	0,7	0,7	0,7
Error (%)	-57,13	-40,62	-54,50	-17,23	-39,47	-	-52,28	-62,50

ND: no detectable

*Muestra con niveles bajos de Arsénico total por lo que no se le realizó la especiación.

Anexo V. Censo de pozos (individual)

<p>CÓDIGO DE POZO: CASP1</p> <p>Localización: 25 de Agosto</p> <p>Coordenadas (UTM): 426065,23 m E 6202010,33 m S Zona 21 H</p>	
<p>Tipo de pozo: Surgente</p> <p>Profundidad total de pozo (m): 40,0</p> <p>Nivel estático (m): 1,31</p> <p>Caudal (m³/h): 12,0</p> <p>Litología alcanzada: Fracturado, granito</p>	

PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS: Medición in situ. Fecha de muestreo: 08/06/2021



Parámetros fisicoquímicos	Valor	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]
pH	7,13	6,5 – 8,5
Eh [mV]	214,4	-
Oxígeno disuelto [ppm]	5,01	-
Conductividad [μ S/cm]	870	2000
Sólidos totales disueltos [ppm]	435	1000
Turbidez [FNU]	0,4	1,0
Temperatura [° C]	18,58	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICO: Fecha de muestreo: 12/08/2021

Elemento Químico [mg/L]	Valor [mg/L]	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]	OMS (2021) Valor sugerido [mg/L]
Dureza Total [mg CaCO ₃ /L]	332,8	500	-
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	470,92	-	-
Cloruros (Cl ⁻)	19,3493	250	1000
Nitratos (NO ₃ ²⁻)	6,4133	50	75
Sulfatos (SO ₄ ⁻)	11,6771	400	800
Sodio (Na ⁺)	23,2456	200	400
Potasio (K ⁺)	2,2218	-	50
Magnesio (Mg ²⁺)	6,9555	-	1000
Calcio (Ca ²⁺)	12,7694	-	500
Arsénico Total (As)	0,016	0,02	0,5
Arseniato (As V)	0,015	-	-
Arsenito (As III)	0,001	-	-
Alcalinidad [mg CaCO ₃ /L]	386,0	-	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO: Fecha de muestreo: 12/08/2021

Parámetro	CASP1	Valor permitido	Métodos
CT ufc/100 mL	<160	<1 ufc/100 mL	APHA 23 ^a Ed. SM 9222 B
CF ufc/100 mL	<52	<1 ufc/100 mL	APHA 23 ^a Ed. SM 9222 D
Ps. aeruginosa ufc/100mL	<1	< 1 ufc/100 mL	UNIT 943:1994
Heterotróficos 35 °C ufc/mL	860	<= 500 ufc/mL	FM/APHA 9215 D 2005

<p>CÓDIGO DE POZO: CASP2</p> <p>Localización: Ruta 21, km 195,5</p> <p>Coordenadas (UTM): 419847,91 m E 6204521,07 m S Zona 21 H</p>	
<p>Tipo de pozo: Semisurgente</p> <p>Profundidad total de pozo (m): Sin dato</p> <p>Nivel estático (m): Sin dato</p> <p>Caudal (m³/h): Sin dato</p> <p>Litología alcanzada: Sedimentario, Formación Raigón</p>	

PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS: Medición in situ. Fecha de muestreo: 26/05/2021



Parámetros fisicoquímicos	Valor	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]
pH	7,33	6,5 – 8,5
Eh [mV]	205,6	-
Oxígeno disuelto [ppm]	3,8	-
Conductividad [μS/cm]	575,0	2000
Sólidos totales disueltos [ppm]	288,0	1000
Turbidez [FNU]	0,1	1,0
Temperatura [° C]	18,76	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICO: Fecha de muestreo: 11/08/2021 Hora: 14.33

Elemento Químico [mg/L]	Valor [mg/L]	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]	OMS (2021) Valor sugerido [mg/L]
Dureza Total [mg CaCO ₃ /L]	237,2	500	-
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	405,04	-	-
Cloruros (Cl ⁻)	7,0856	250	1000
Nitratos (NO ₃ ²⁻)	3,3432	50	75
Sulfatos (SO ₄ ⁻)	10,1368	400	800
Sodio (Na ⁺)	27,9852	200	400
Potasio (K ⁺)	14,0264	-	50
Magnesio (Mg ²⁺)	12,5409	-	1000
Calcio (Ca ²⁺)	13,4325	-	500
Arsénico Total (As)	0,011	0,02	0,5
Arseniato (As V)	0,008	-	-
Arsenito (As III)	0,003	-	-
Alcalinidad [mg CaCO ₃ /L]	332,0	-	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO: Fecha de muestreo: 11/08/2021 Hora: 14.35

Parámetro	CASP2	Valor permitido	Métodos
CT ufc/100 mL	<1	<1 ufc/100 mL	APHA 23 ^a Ed. SM 9222 B
CF ufc/100 mL	<1	<1 ufc/100 mL	APHA 23 ^a Ed. SM 9222 D
Ps. aeruginosa ufc/100mL	22	< 1ufc/100 mL	UNIT 943:1994
Heterotróficos 35 °C ufc/mL	660	<= 500 ufc/mL	FM/APHA 9215 D 2005

<p>CÓDIGO DE POZO: CASP3</p> <p>Localización: camino sin denominación, a 5,1 km de Ruta 21</p> <p>Coordenadas (UTM): 419052,98 m E 6193711,31 m S Zona 21 H</p>	
<p>Tipo de pozo: Brocal</p> <p>Profundidad total de pozo (m): 6,97</p> <p>Nivel estático (m): 5,53</p> <p>Caudal (m³/h): 2,0</p> <p>Litología alcanzada: Sedimentario, Formación Raigón</p>	

PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS: Medición in situ. Fecha de muestreo: 08/06/2021



Parámetros fisicoquímicos	Valor	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]
pH	7,22	6,5 – 8,5
Eh [mV]	205,7	-
Oxígeno disuelto [ppm]	5,04	-
Conductividad [μ S/cm]	899,0	2000
Sólidos totales disueltos [ppm]	450,0	1000
Turbidez [FNU]	0,5	1,0
Temperatura [° C]	17,93	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICO: Fecha de muestreo: 11/08/2021 Hora: 12.15

Elemento Químico [mg/L]	Valor [mg/L]	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]	OMS (2021) Valor sugerido [mg/L]
Dureza Total [mg CaCO ₃ /L]	312,9	500	-
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	529,48	-	-
Cloruros (Cl ⁻)	39,1887	250	1000
Nitratos (NO ₃ ²⁻)	11,5450	50	75
Sulfatos (SO ₄ ⁻)	20,7174	400	800
Sodio (Na ⁺)	37,3348	200	400
Potasio (K ⁺)	4,1253	-	50
Magnesio (Mg ²⁺)	5,9213	-	1000
Calcio (Ca ²⁺)	2,7989	-	500
Arsénico Total (As)	0,022	0,02	0,5
Arseniato (As V)	0,017	-	-
Arsenito (As III)	0,005	-	-
Alcalinidad [mg CaCO ₃ /L]	434,0	-	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO: Fecha de muestreo: 11/08/2021 Hora: 12.15

Parámetro	CASP3	Valor permitido	Métodos
CT ufc/100 mL	>160	<1 ufc/100 mL	APHA 23ª Ed. SM 9222 B
CF ufc/100 mL	<1	<1 ufc/100 mL	APHA 23ª Ed. SM 9222 D
Ps. aeruginosa ufc/100mL	<1	< 1ufc/100 mL	UNIT 943:1994
Heterotróficos 35 °C ufc/mL	>2000	<= 500 ufc/mL	FM/APHA 9215 D 2005

<p>CÓDIGO DE POZO: CASP4</p> <p>Localización: camino sin denominación, a 3,8 km de Ruta 83</p> <p>Coordenadas (UTM): 427011,41 m E 6207479,60 m S Zona 21 H</p>	
<p>Tipo de pozo: Surgente</p> <p>Profundidad total de pozo (m): 48,0</p> <p>Nivel estático (m): 19,17</p> <p>Caudal (m³/h): 5,5</p> <p>Litología alcanzada: Fracturado, granito</p>	

PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS: Medición in situ. Fecha de muestreo: 08/06/2021

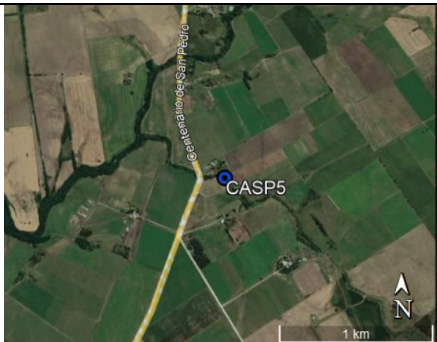

Parámetros fisicoquímicos	Valor	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]
pH	7,4	6,5 – 8,5
Eh [mV]	180,5	-
Oxígeno disuelto [ppm]	4,75	-
Conductividad [μ S/cm]	929,0	2000
Sólidos totales disueltos [ppm]	466,0	1000
Salinidad [PSU]	0,46	-
Turbidez [FNU]	0,4	1,0
Temperatura [° C]	14,64	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICO: Fecha de muestreo: 12/08/2021 Hora: 09.49

Elemento Químico [mg/L]	Valor [mg/L]	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]	OMS (2021) Valor sugerido [mg/L]
Dureza Total [mg CaCO ₃ /L]	153,5	500	-
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	531,92	-	-
Cloruros (Cl ⁻)	23,2541	250	1000
Nitratos (NO ₃ ²⁻)	44,5389	50	75
Sulfatos (SO ₄ ⁻)	23,1943	400	800
Sodio (Na ⁺)	69,3024	200	400
Potasio (K ⁺)	0,9452	-	50
Magnesio (Mg ²⁺)	0,8564	-	1000
Calcio (Ca ²⁺)	3,3224	-	500
Arsénico Total (As)	0,034	0,02	0,5
Arseniato (As V)	0,030	-	-
Arsenito (As III)	0,004	-	-
Alcalinidad [mg CaCO ₃ /L]	436,0	-	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO: Fecha de muestreo: 12/08/2021 Hora: 09.52

Parámetro	CASP4	Valor permitido	Métodos
CT ufc/100 mL	>160	<1 ufc/100 mL	APHA 23 ^a Ed. SM 9222 B
CF ufc/100 mL	<1	<1 ufc/100 mL	APHA 23 ^a Ed. SM 9222 D
Ps. aeruginosa ufc/100mL	<1	< 1ufc/100 mL	UNIT 943:1994
Heterotróficos 35 °C ufc/mL	410	<= 500 ufc/mL	FM/APHA 9215 D 2005

<p>CÓDIGO DE POZO: CASP5</p> <p>Localización: Ruta 83</p> <p>Coordenadas (UTM): 423772,95 m E 6203700,63 m S Zona 21 H</p>			
<p>Tipo de pozo: Surgente</p> <p>Profundidad total de pozo (m): 40,0</p> <p>Nivel estático (m): 0,78</p> <p>Caudal (m³/h): 10,0</p> <p>Litología alcanzada: Fracturado, granito</p>			

PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS: Medición in situ. Fecha de muestreo: 09/06/2021

Parámetros fisicoquímicos	Valor	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]
pH	6,91	6,5 – 8,5
Eh [mV]	215,1	-
Oxígeno disuelto [ppm]	3,67	-
Conductividad [μ S/cm]	764,0	2000
Sólidos totales disueltos [ppm]	382,0	1000
Turbidez [FNU]	0,1	1,0
Temperatura [° C]	19,03	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICO: Fecha de muestreo: 11/08/2021 Hora: 13.30

Elemento Químico [mg/L]	Valor [mg/L]	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]	OMS (2021) Valor sugerido [mg/L]
Dureza Total [mg CaCO ₃ /L]	318,9	500	-
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	387,96	-	-
Cloruros (Cl ⁻)	9,9687	250	1000
Nitratos (NO ₃ ²⁻)	12,6993	50	75
Sulfatos (SO ₄ ⁻)	9,5051	400	800
Sodio (Na ⁺)	8,7214	200	400
Potasio (K ⁺)	13,0196	-	50
Magnesio (Mg ²⁺)	9,4569	-	1000
Calcio (Ca ²⁺)	6,7281	-	500
Arsénico Total (As)	0,009	0,02	0,5
Arseniato (As V)	**	-	-
Arsenito (As III)	**	-	-
Alcalinidad [mg CaCO ₃ /L]	318,0	-	-

**Muestra con niveles bajos de Arsénico Total por lo que no se le realizó la especiación.

RESULTADOS DE ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO: Fecha de muestreo: 11/08/2021 Hora: 13.34

Parámetro	CASP5	Valor permitido	Métodos
CT ufc/100 mL	>160	<1 ufc/100 mL	APHA 23 ^a Ed. SM 9222 B
CF ufc/100 mL	>120	<1 ufc/100 mL	APHA 23 ^a Ed. SM 9222 D
Ps. aeruginosa ufc/100mL	<1	< 1 ufc/100 mL	UNIT 943:1994
Heterotróficos 35 °C ufc/mL	1840	<= 500 ufc/mL	FM/APHA 9215 D 2005

CÓDIGO DE POZO: CASP6

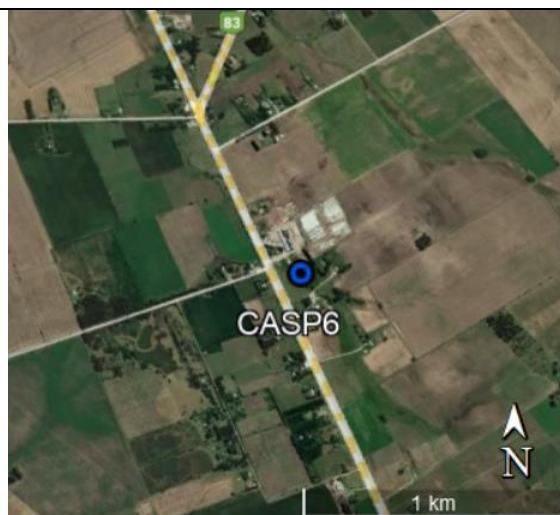
Localización: Ruta 21, km 188

Coordenadas (UTM):

421917,95 m E

6197724,96 m S

Zona 21 H



Tipo de pozo: Surgente

Profundidad total de pozo (m): 20,0

Nivel estático (m): 2,22

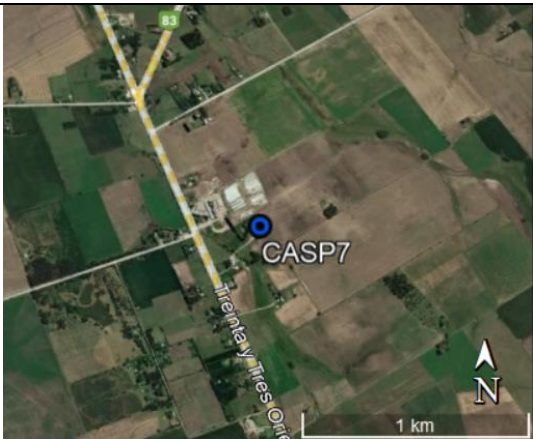

Caudal (m³/h): 5,0

Litología alcanzada: Fracturado, granito



PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS: Medición in situ. Fecha de muestreo: 28/05/2021

Parámetros fisicoquímicos	Valor	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]
pH	7,19	6,5 – 8,5
Eh [mV]	190,8	-
Oxígeno disuelto [ppm]	3,19	-
Conductividad [μ S/cm]	829,0	2000
Sólidos totales disueltos [ppm]	414,0	1000
Turbidez [FNU]	1,0	1,0
Temperatura [° C]	18,89	-

<p>CÓDIGO DE POZO: CASP7</p> <p>Localización: Ruta 21, km 188</p> <p>Coordenadas (UTM): 422098,57 m E 6197786,54 m S Zona 21 H</p>	
<p>Tipo de pozo: Surgente</p> <p>Profundidad total de pozo (m): 40,0</p> <p>Nivel estático (m): 7,23</p> <p>Caudal (m³/h): 4,0</p> <p>Litología alcanzada: Fracturado, granito</p>	

PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS: Sin acceso (Fecha 28/05/21)

RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICO: Fecha de muestreo: 11/08/2021 Hora: 10.26

Elemento Químico [mg/L]	Valor [mg/L]	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]	OMS (2021) Valor sugerido [mg/L]
Dureza Total [mg CaCO ₃ /L]	287,0	500	-
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	498,98	-	-
Cloruros (Cl ⁻)	14,1304	250	1000
Nitratos (NO ₃ ²⁻)	36,4762	50	75
Sulfatos (SO ₄ ⁻)	12,0585	400	800
Sodio (Na ⁺)	35,8201	200	400
Potasio (K ⁺)	2,0431	-	50
Magnesio (Mg ²⁺)	6,3543	-	1000
Calcio (Ca ²⁺)	80,4730	-	500
Arsénico Total (As)	0,016	0,02	0,5
Arseniato (As V)	0,013	-	-
Arsenito (As III)	0,003	-	-
Alcalinidad [mg CaCO ₃ /L]	409,0	-	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO: Fecha de muestreo: 11/08/2021 Hora: 10.26

Parámetro	CASP7	Valor permitido	Métodos
CT ufc/100 mL	104	<1 ufc/100 mL	APHA 23ª Ed. SM 9222 B
CF ufc/100 mL	20	<1 ufc/100 mL	APHA 23ª Ed. SM 9222 D
Ps. aeruginosa ufc/100mL	<1	< 1ufc/100 mL	UNIT 943:1994
Heterotróficos 35 °C ufc/mL	760	<= 500 ufc/mL	FM/APHA 9215 D 2005

CÓDIGO DE POZO: CASP8

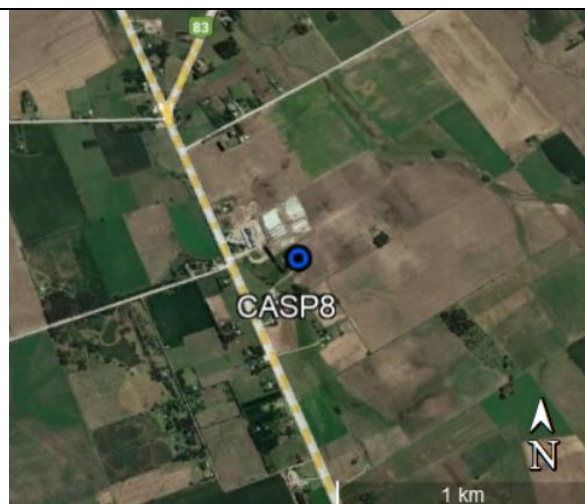
Localización: Ruta 21, km 188

Coordenadas (UTM):

422078,21 m E

6197776,82 m S

Zona 21 H



Tipo de pozo: Brocal

Profundidad total de pozo (m): 11,22

Nivel estático (m): 6,3



Caudal (m³/h): Sin dato

Litología alcanzada: Sedimentario, Formación Raigón



PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS: Medición in situ. No directo. Fecha de muestreo: 28/05/2021

Parámetros fisicoquímicos	Valor	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]
pH	7,35	6,5 – 8,5
Eh [mV]	176,5	-
Oxígeno disuelto [ppm]	4,54	-
Conductividad [μ S/cm]	665,0	2000
Sólidos totales disueltos [ppm]	333,0	1000
Turbidez [FNU]	0,1	1,0
Temperatura [° C]	19,16	-

<p>CÓDIGO DE POZO: CASP9</p> <p>Localización: Camino 18 de Julio</p> <p>Coordenadas (UTM): 425953,48 m E 6200276,40 m S Zona 21 H</p>	
<p>Tipo de pozo: Brocal</p> <p>Profundidad total de pozo (m): 14,51</p> <p>Nivel estático (m): 12,26</p> <p>Caudal (m³/h): 0,7</p> <p>Litología alcanzada: Sedimentario, Formación Raigón</p>	

PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS: Medición in situ. Fecha de muestreo: 09/06/2021



Parámetros fisicoquímicos	Valor	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]
pH	7,37	6,5 – 8,5
Eh [mV]	214,4	-
Oxígeno disuelto [ppm]	5,56	-
Conductividad [μS/cm]	2346,0	2000
Sólidos totales disueltos [ppm]	1173,0	1000
Turbidez [FNU]	0,4	1,0
Temperatura [° C]	18,33	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICO: Fecha de muestreo: 11/08/2021 Hora: 11.26

Elemento Químico [mg/L]	Valor [mg/L]	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]	OMS (2021) Valor sugerido [mg/L]
Dureza Total [mg CaCO ₃ /L]	312,9	500	-
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	553,88	-	-
Cloruros (Cl ⁻)	No detectable	250	1000
Nitratos (NO ₃ ²⁻)	No detectable	50	75
Sulfatos (SO ₄ ⁻)	No detectable	400	800
Sodio (Na ⁺)	107,7754	200	400
Potasio (K ⁺)	0,9452	-	50
Magnesio (Mg ²⁺)	6,2522	-	1000
Calcio (Ca ²⁺)	13,3568	-	500
Arsénico Total (As)	0,014	0,02	0,5
Arseniato (As V)	0,011	-	-
Arsenito (As III)	0,003	-	-
Alcalinidad [mg CaCO ₃ /L]	454,0	-	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO: Fecha de muestreo: 11/08/2021 Hora: 11.30

Parámetro	CASP9	Valor permitido	Métodos
CT ufc/100 mL	>160	<1 ufc/100 mL	APHA 23 ^a Ed. SM 9222 B
CF ufc/100 mL	<1	<1 ufc/100 mL	APHA 23 ^a Ed. SM 9222 D
Ps. aeruginosa ufc/100mL	<1	< 1ufc/100 mL	UNIT 943:1994
Heterotróficos 35 °C ufc/mL	>2000	<= 500 ufc/mL	FM/APHA 9215 D 2005

<p>CÓDIGO DE POZO: CASP10</p> <p>Localización: 4 de Febrero</p> <p>Coordenadas (UTM): 419092,88 m E 6195940,71 m S Zona 21 H</p>	
<p>Tipo de pozo: Semisurgente</p> <p>Profundidad total de pozo (m): 31,0</p> <p>Nivel estático (m): Sin dato</p> <p>Caudal (m³/h): Sin dato</p> <p>Litología alcanzada: Sedimentario, Formación Raigón</p>	

PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS: Medición in situ. Fecha de muestreo: 08/06/2021



Parámetros fisicoquímicos	Valor	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]
pH	7,13	6,5 – 8,5
Eh [mV]	201,3	-
Oxígeno disuelto [ppm]	6,14	-
Conductividad [µS/cm]	599,0	2000
Sólidos totales disueltos [ppm]	299,0	1000
Turbidez [FNU]	0,8	1,0
Temperatura [° C]	20,29	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICO: Fecha de muestreo: 11/08/2021 Hora: 14.55

Elemento Químico [mg/L]	Valor [mg/L]	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]	OMS (2021) Valor sugerido [mg/L]
Dureza Total [mg CaCO ₃ /L]	179,5	500	-
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	433,1	-	-
Cloruros (Cl ⁻)	8,3821	250	1000
Nitratos (NO ₃ ²⁻)	22,9146	50	75
Sulfatos (SO ₄ ⁻)	10,7583	400	800
Sodio (Na ⁺)	31,3446	200	400
Potasio (K ⁺)	0,1689	-	50
Magnesio (Mg ²⁺)	19,5463	-	1000
Calcio (Ca ²⁺)	3,2412	-	500
Arsénico Total (As)	0,023	0,02	0,5
Arseniato (As V)	0,019	-	-
Arsenito (As III)	0,004	-	-
Alcalinidad [mg CaCO ₃ /L]	355,0	-	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO: Fecha de muestreo: 11/08/2021 Hora: 14.55

Parámetro	CASP10	Valor permitido	Métodos
CT ufc/100 mL	<1	<1 ufc/100 mL	APHA 23ª Ed. SM 9222 B
CF ufc/100 mL	<1	<1 ufc/100 mL	APHA 23ª Ed. SM 9222 D
Ps. aeruginosa ufc/100mL	54	< 1ufc/100 mL	UNIT 943:1994
Heterotróficos 35 °C ufc/mL	1620	<= 500 ufc/mL	FM/APHA 9215 D 2005

<p>CÓDIGO DE POZO: CASP11</p> <p>Localización: Ruta 21, km 197</p> <p>Coordenadas (UTM): 420706,36 m E 6206000,56 m S Zona 21 H</p>	
<p>Tipo de pozo: Semisurgente</p> <p>Profundidad total de pozo (m): 18,0</p> <p>Nivel estático (m): Sin dato,</p> <p>Caudal (m³/h): 5,0</p> <p>Litología alcanzada: Sedimentario, Formación Raigón</p>	



PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS: Medición in situ. Fecha de muestreo: 08/06/2021

Parámetros fisicoquímicos	Valor	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]
pH	7,24	6,5 – 8,5
Eh [mV]	201,0	-
Oxígeno disuelto [ppm]	6,65	-
Conductividad [μ S/cm]	702,0	2000
Sólidos totales disueltos [ppm]	351,0	1000
Turbidez [FNU]	0,1	1,0
Temperatura [° C]	18,15	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICO: Fecha de muestreo: 11/08/2021 Hora: 15.19 (No directo)

Elemento Químico [mg/L]	Valor [mg/L]	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]	OMS (2021) Valor sugerido [mg/L]
Dureza Total [mg CaCO ₃ /L]	243,1	500	-
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	418,46	-	-
Cloruros (Cl ⁻)	7,0487	250	1000
Nitratos (NO ₃ ²⁻)	6,2061	50	75
Sulfatos (SO ₄ ⁻)	15,9682	400	800
Sodio (Na ⁺)	18,1720	200	400
Potasio (K ⁺)	14,9291	-	50
Magnesio (Mg ²⁺)	10,6838	-	1000
Calcio (Ca ²⁺)	6,2857	-	500
Arsénico Total (As)	0,016	0,02	0,5
Arseniato (As V)	0,014	-	-
Arsenito (As III)	0,002	-	-
Alcalinidad [mg CaCO ₃ /L]	343,0	-	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO: No se encuentra el resultado en los resultados enviados por el Laboratorio Agroindustrial COLAVECO.

<p>CÓDIGO DE POZO: CASP12</p> <p>Localización: Ruta 83</p> <p>Coordenadas (UTM): 424076,26 m E 6207340,14 m S Zona 21 H</p>	
<p>Tipo de pozo: Brocal</p> <p>Profundidad total de pozo (m): 14,04</p> <p>Nivel estático (m): 12,16</p> <p>Caudal (m³/h): Sin dato</p> <p>Litología alcanzada: Sedimentario, Formación Raigón</p>	

PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS: Medición in situ. Fecha de muestreo: 26/05/2021



Parámetros fisicoquímicos	Valor	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]
pH	7,11	6,5 – 8,5
Eh [mV]	235,9	-
Oxígeno disuelto [ppm]	3,31	-
Conductividad [μS/cm]	1082,0	2000
Sólidos totales disueltos [ppm]	542,0	1000
Turbidez [FNU]	1,0	1,0
Temperatura [° C]	19,31	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICO: Fecha de muestreo: 11/08/2021 Hora: 14.11

Elemento Químico [mg/L]	Valor [mg/L]	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]	OMS (2021) Valor sugerido [mg/L]
Dureza Total [mg CaCO ₃ /L]	269,1	500	-
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	387,96	-	-
Cloruros (Cl ⁻)	3,6785	250	1000
Nitratos (NO ₃ ²⁻)	17,2841	50	75
Sulfatos (SO ₄ ⁻)	8,1626	400	800
Sodio (Na ⁺)	20,0137	200	400
Potasio (K ⁺)	2,4687	-	50
Magnesio (Mg ²⁺)	3,6676	-	1000
Calcio (Ca ²⁺)	8,8570	-	500
Arsénico Total (As)	0,009	0,02	0,5
Arseniato (As V)	0,008	-	-
Arsenito (As III)	0,001	-	-
Alcalinidad [mg CaCO ₃ /L]	318,0	-	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO: Fecha de muestreo: 11/08/2021 Hora: 14.15

Parámetro	CASP12	Valor permitido	Métodos
CT ufc/100 mL	>160	<1 ufc/100 mL	APHA 23 ^a Ed. SM 9222 B
CF ufc/100 mL	38	<1 ufc/100 mL	APHA 23 ^a Ed. SM 9222 D
Ps. aeruginosa ufc/100mL	<1	< 1ufc/100 mL	UNIT 943:1994
Heterotróficos 35 °C ufc/mL	1670	<= 500 ufc/mL	FM/APHA 9215 D 2005

<p>CÓDIGO DE POZO: CASP13</p> <p>Localización: 19 de Abril y Camino 18 de Julio</p> <p>Coordenadas (UTM): 425157,18 m E 6200379,10 m S Zona 21 H</p>	
<p>Tipo de pozo: Brocal</p> <p>Profundidad total de pozo (m): 13,36</p> <p>Nivel estático (m): 9,1</p> <p>Caudal (m³/h): Sin dato</p> <p>Litología alcanzada: Sedimentario, Formación Raigón</p>	

PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS: Medición in situ. Fecha de muestreo: 09/06/2021

Parámetros fisicoquímicos	Valor	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]
pH	7,54	6,5 – 8,5
Eh [mV]	194,2	-
Oxígeno disuelto [ppm]	5,49	-
Conductividad [μ S/cm]	945,0	2000
Sólidos totales disueltos [ppm]	472,0	1000
Turbidez [FNU]	1,3	1,0
Temperatura [° C]	18,84	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICO: Fecha de muestreo: 11/08/2021 Hora: 11.09

Elemento Químico [mg/L]	Valor [mg/L]	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]	OMS (2021) Valor sugerido [mg/L]
Dureza Total [mg CaCO ₃ /L]	223,2	500	-
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	620,98	-	-
Cloruros (Cl ⁻)	23,5943	250	1000
Nitratos (NO ₃ ⁻)	25,7006	50	75
Sulfatos (SO ₄ ⁻)	39,4427	400	800
Sodio (Na ⁺)	35,4598	200	400
Potasio (K ⁺)	14,9082	-	50
Magnesio (Mg ²⁺)	10,9605	-	1000
Calcio (Ca ²⁺)	2,5931	-	500
Arsénico Total (As)	0,022	0,02	0,5
Arseniato (As V)	0,018	-	-
Arsenito (As III)	0,004	-	-
Alcalinidad [mg CaCO ₃ /L]	509,0	-	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO: Fecha de muestreo: 11/08/2021 Hora: 11.12

Parámetro	CASP13	Valor permitido	Métodos
CT ufc/100 mL	>160	<1 ufc/100 mL	APHA 23ª Ed. SM 9222 B
CF ufc/100 mL	16	<1 ufc/100 mL	APHA 23ª Ed. SM 9222 D
Ps. aeruginosa ufc/100mL	<1	< 1ufc/100 mL	UNIT 943:1994
Heterotróficos 35 °C ufc/mL	1190	<= 500 ufc/mL	FM/APHA 9215 D 2005

CÓDIGO DE POZO: CASP14

Localización: camino sin denominación, a 10 km de Ruta 21

Coordenadas (UTM):

430148,05 m E
6201090,81 m S
Zona 21 H

Tipo de pozo: Surgente

Profundidad total de pozo (m): 34,0

Nivel estático (m): Sin dato

Caudal (m³/h): 10,0

Litología alcanzada: Fracturado, granito

**PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS:** Medición in situ. No directo. Fecha de muestreo: 09/06/2021



Parámetros fisicoquímicos	Valor	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]
pH	7,3	6,5 – 8,5
Eh [mV]	224,6	-
Oxígeno disuelto [ppm]	4,47	-
Conductividad [µS/cm]	691,0	2000
Sólidos totales disueltos [ppm]	346,0	1000
Turbidez [FNU]	0,1	1,0
Temperatura [° C]	16,31	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICO: Fecha de muestreo: 11/08/2021 Hora: 10.21

Elemento Químico [mg/L]	Valor [mg/L]	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]	OMS (2021) Valor sugerido [mg/L]
Dureza Total [mg CaCO ₃ /L]	283,0	500	-
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	545,34	-	-
Cloruros (Cl ⁻)	9,1188	250	1000
Nitratos (NO ₃ ²⁻)	0,0780	50	75
Sulfatos (SO ₄ ⁻)	11,1777	400	800
Sodio (Na ⁺)	25,9327	200	400
Potasio (K ⁺)	1,6176	-	50
Magnesio (Mg ²⁺)	5,4988	-	1000
Calcio (Ca ²⁺)	15,2790	-	500
Arsénico Total (As)	0,014	0,02	0,5
Arseniato (As V)	0,011	-	-
Arsenito (As III)	0,002	-	-
Alcalinidad [mg CaCO ₃ /L]	447,0	-	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO: Fecha de muestreo: 11/08/2021 Hora: 10.23

Parámetro	CASP14	Valor permitido	Métodos
CT ufc/100 mL	<1	<1 ufc/100 mL	APHA 23 ^a Ed. SM 9222 B
CF ufc/100 mL	<1	<1 ufc/100 mL	APHA 23 ^a Ed. SM 9222 D
Ps. aeruginosa ufc/100mL	<1	< 1ufc/100 mL	UNIT 943:1994
Heterotróficos 35 °C ufc/mL	110	<= 500 ufc/mL	FM/APHA 9215 D 2005

<p>CÓDIGO DE POZO: CASP15</p> <p>Localización: Camino vecinal</p> <p>Coordenadas (UTM): 418481,97 m E 6195496,42 m S Zona 21 H</p>	
<p>Tipo de pozo: Semisurgente</p> <p>Profundidad total de pozo (m): 34,0</p> <p>Nivel estático (m): 9,5</p> <p>Caudal (m³/h): 3,6</p> <p>Litología alcanzada: Sedimentario, Formación Raigón</p>	

PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS: Medición in situ. Fecha de muestreo: 08/06/2021



Parámetros fisicoquímicos	Valor	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]
pH	7,08	6,5 – 8,5
Eh [mV]	184,6	-
Oxígeno disuelto [ppm]	5,59	-
Conductividad [μ S/cm]	768,0	2000
Sólidos totales disueltos [ppm]	384,0	1000
Turbidez [FNU]	0,8	1,0
Temperatura [° C]	18,69	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICO: Fecha de muestreo: 11/08/2021 Hora: 11.35

Elemento Químico [mg/L]	Valor [mg/L]	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]	OMS (2021) Valor sugerido [mg/L]
Dureza Total [mg CaCO ₃ /L]	253,1	500	-
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	359,9	-	-
Cloruros (Cl ⁻)	36,5148	250	1000
Nitratos (NO ₃ ²⁻)	31,9906	50	75
Sulfatos (SO ₄ ⁻)	28,5169	400	800
Sodio (Na ⁺)	26,6857	200	400
Potasio (K ⁺)	16,0384	-	50
Magnesio (Mg ²⁺)	12,1918	-	1000
Calcio (Ca ²⁺)	9,1759	-	500
Arsénico Total (As)	0,012	0,02	0,5
Arseniato (As V)	0,010	-	-
Arsenito (As III)	0,002	-	-
Alcalinidad [mg CaCO ₃ /L]	295,0	-	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO: Fecha de muestreo: 11/08/2021 Hora: 11.35

Parámetro	CASP15	Valor permitido	Métodos
CT ufc/100 mL	<1	<1 ufc/100 mL	APHA 23 ^a Ed. SM 9222 B
CF ufc/100 mL	<1	<1 ufc/100 mL	APHA 23 ^a Ed. SM 9222 D
Ps. aeruginosa ufc/100mL	<1	< 1 ufc/100 mL	UNIT 943:1994
Heterotróficos 35 °C ufc/mL	390	<= 500 ufc/mL	FM/APHA 9215 D 2005

<p>CÓDIGO DE POZO: CASP16</p> <p>Localización: 25 de Agosto</p> <p>Coordenadas (UTM): 425422,53 m E 6204371,29 m S Zona 21 H</p>	
<p>Tipo de pozo: Surgente</p> <p>Profundidad total de pozo (m): 32,0</p> <p>Nivel estático (m): 6,98</p> <p>Caudal (m³/h): 6,5</p> <p>Litología alcanzada: Fracturado, granito</p>	

PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS: Medición in situ. Fecha de muestreo: 09/06/2021



Parámetros fisicoquímicos	Valor	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]
pH	7,36	6,5 – 8,5
Eh [mV]	207,1	-
Oxígeno disuelto [ppm]	5,1	-
Conductividad [μ S/cm]	831,0	2000
Sólidos totales disueltos [ppm]	416,0	1000
Turbidez [FNU]	0	1,0
Temperatura [$^{\circ}$ C]	17,88	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICO: Fecha de muestreo: 11/08/2021 Hora: 14.44

Elemento Químico [mg/L]	Valor [mg/L]	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]	OMS (2021) Valor sugerido [mg/L]
Dureza Total [mg CaCO ₃ /L]	229,2	500	-
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	524,6	-	-
Cloruros (Cl ⁻)	7,4860	250	1000
Nitratos (NO ₃ ²⁻)	30,2474	50	75
Sulfatos (SO ₄ ⁻)	10,7946	400	800
Sodio (Na ⁺)	16,4408	200	400
Potasio (K ⁺)	12,5063	-	50
Magnesio (Mg ²⁺)	9,1402	-	1000
Calcio (Ca ²⁺)	1,6108	-	500
Arsénico Total (As)	0,019	0,02	0,5
Arseniato (As V)	0,017	-	-
Arsenito (As III)	0,002	-	-
Alcalinidad [mg CaCO ₃ /L]	430,0	-	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO: Fecha de muestreo: 11/08/2021 Hora: 14.47

Parámetro	CASP16	Valor permitido	Métodos
CT ufc/100 mL	<1	<1 ufc/100 mL	APHA 23 ^a Ed. SM 9222 B
CF ufc/100 mL	<1	<1 ufc/100 mL	APHA 23 ^a Ed. SM 9222 D
Ps. aeruginosa ufc/100mL	>400	< 1ufc/100 mL	UNIT 943:1994
Heterotróficos 35 °C ufc/mL	440	<= 500 ufc/mL	FM/APHA 9215 D 2005

<p>CÓDIGO DE POZO: CASP17</p> <p>Localización: Ruta 83</p> <p>Coordenadas (UTM): 422001,17 m E 6199537,59 m S Zona 21 H</p>	
<p>Tipo de pozo: Brocal</p> <p>Profundidad total de pozo (m): 5,84</p> <p>Nivel estático (m): 3,86</p> <p>Caudal (m³/h): Sin dato</p> <p>Litología alcanzada: Sedimentario, Formación Raigón</p>	

PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS: Medición in situ. Fecha de muestreo: 26/05/2021

Parámetros fisicoquímicos	Valor	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]
pH	6,85	6,5 – 8,5
Eh [mV]	236,5	-
Oxígeno disuelto [ppm]	2,69	-
Conductividad [μS/cm]	474,0	2000
Sólidos totales disueltos [ppm]	238,0	1000
Turbidez [FNU]	0,2	1,0
Temperatura [° C]	18,1	-



RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICO: Fecha de muestreo: 12/08/2021 Hora: 09.35

Elemento Químico [mg/L]	Valor [mg/L]	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]	OMS (2021) Valor sugerido [mg/L]
Dureza Total [mg CaCO ₃ /L]	259,7	500	-
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	367,22	-	-
Cloruros (Cl ⁻)	7,1156	250	1000
Nitratos (NO ₃ ²⁻)	14,3355	50	75
Sulfatos (SO ₄ ⁻)	6,8579	400	800
Sodio (Na ⁺)	13,4274	200	400
Potasio (K ⁺)	2,3875	-	50
Magnesio (Mg ²⁺)	1,9205	-	1000
Calcio (Ca ²⁺)	19,9139	-	500
Arsénico Total (As)	0,006	0,02	0,5
Arseniato (As V)	**	-	-
Arsenito (As III)	**	-	-
Alcalinidad [mg CaCO ₃ /L]	301,0	-	-

**Muestra con niveles bajos de Arsénico Total por lo que no se le realizó la especiación.

RESULTADOS DE ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO: Fecha de muestreo: 12/08/2021 Hora: 09.35

Parámetro	CASP17	Valor permitido	Métodos
CT ufc/100 mL	>160	<1 ufc/100 mL	APHA 23 ^a Ed. SM 9222 B
CF ufc/100 mL	24	<1 ufc/100 mL	APHA 23 ^a Ed. SM 9222 D
Ps. aeruginosa ufc/100mL	<1	< 1ufc/100 mL	UNIT 943:1994
Heterotróficos 35 °C ufc/mL	400	<= 500 ufc/mL	FM/APHA 9215 D 2005

<p>CÓDIGO DE POZO: CASP18</p> <p>Localización: Camino Comercio a Camino Neme</p> <p>Coordenadas (UTM): 421678,44 m E 6197772,55 m S Zona 21 H</p>	
<p>Tipo de pozo: Surgente</p> <p>Profundidad total de pozo (m): 28,0</p> <p>Nivel estático (m): 9,87</p> <p>Caudal (m³/h): 12,0</p> <p>Litología alcanzada: Fracturado, granito</p>	

PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS: Medición in situ. Fecha de muestreo: 09/06/2021



Parámetros fisicoquímicos	Valor	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]
pH	7,0	6,5 – 8,5
Eh [mV]	210,1	-
Oxígeno disuelto [ppm]	3,08	-
Conductividad [μ S/cm]	880,0	2000
Sólidos totales disueltos [ppm]	440,0	1000
Turbidez [FNU]	0	1,0
Temperatura [° C]	19,01	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICO: Fecha de muestreo: 12/08/2021

Elemento Químico [mg/L]	Valor [mg/L]	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]	OMS (2021) Valor sugerido [mg/L]
Dureza Total [mg CaCO ₃ /L]	210,0	500	-
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	520,94	-	-
Cloruros (Cl ⁻)	22,3993	250	1000
Nitratos (NO ₃ ²⁻)	0,1304	50	75
Sulfatos (SO ₄ ⁻)	19,1833	400	800
Sodio (Na ⁺)	33,7331	200	400
Potasio (K ⁺)	2,1276	-	50
Magnesio (Mg ²⁺)	2,3542	-	1000
Calcio (Ca ²⁺)	9,3196	-	500
Arsénico Total (As)	0,019	0,02	0,5
Arseniato (As V)	0,015	-	-
Arsenito (As III)	0,004	-	-
Alcalinidad [mg CaCO ₃ /L]	427,0	-	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO: Fecha de muestreo: 12/08/2021

Parámetro	CASP18	Valor permitido	Métodos
CT ufc/100 mL	22	<1 ufc/100 mL	APHA 23ª Ed. SM 9222 B
CF ufc/100 mL	<1	<1 ufc/100 mL	APHA 23ª Ed. SM 9222 D
Ps. aeruginosa ufc/100mL	<1	<1 ufc/100 mL	UNIT 943:1994
Heterotróficos 35 °C ufc/mL	310	<= 500 ufc/mL	FM/APHA 9215 D 2005

<p>CÓDIGO DE POZO: CASP19</p> <p>Localización: 25 de Agosto</p> <p>Coordenadas (UTM): 427970,06 m E 6201379,24 m S Zona 21 H</p>	
<p>Tipo de pozo: Semisurgente</p> <p>Profundidad total de pozo (m): 37,0</p> <p>Nivel estático (m): 8,15</p> <p>Caudal (m³/h): 3,0</p> <p>Litología alcanzada: Sedimentario, Formación Raigón</p>	

PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS: Medición in situ. Fecha de muestreo: 09/06/2021

Parámetros fisicoquímicos	Valor	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]
pH	7,51	6,5 – 8,5
Eh [mV]	196,7	-
Oxígeno disuelto [ppm]	5,18	-
Conductividad [μ S/cm]	1030,0	2000
Sólidos totales disueltos [ppm]	515,0	1000
Turbidez [FNU]	0	1,0
Temperatura [° C]	18,95	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICO: Fecha de muestreo: 11/08/2021 Hora: 10:48

Elemento Químico [mg/L]	Valor [mg/L]	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]	OMS (2021) Valor sugerido [mg/L]
Dureza Total [mg CaCO ₃ /L]	211,3	500	-
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	539,24	-	-
Cloruros (Cl ⁻)	40,1640	250	1000
Nitratos (NO ₃ ²⁻)	18,9208	50	75
Sulfatos (SO ₄ ⁻)	31,6574	400	800
Sodio (Na ⁺)	63,0057	200	400
Potasio (K ⁺)	15,5233	-	50
Magnesio (Mg ²⁺)	13,1611	-	1000
Calcio (Ca ²⁺)	7,8744	-	500
Arsénico Total (As)	0,024	0,02	0,5
Arseniato (As V)	0,020	-	-
Arsenito (As III)	0,004	-	-
Alcalinidad [mg CaCO ₃ /L]	442,0	-	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO: Fecha de muestreo: 11/08/2021 Hora: 10:52

Parámetro	CASP19	Valor permitido	Métodos
CT ufc/100 mL	<1	<1 ufc/100 mL	APHA 23 ^a Ed. SM 9222 B
CF ufc/100 mL	<1	<1 ufc/100 mL	APHA 23 ^a Ed. SM 9222 D
Ps. aeruginosa ufc/100mL	<1	< 1ufc/100 mL	UNIT 943:1994
Heterotróficos 35 °C ufc/mL	70	<= 500 ufc/mL	FM/APHA 9215 D 2005

<p>CÓDIGO DE POZO: CASP20</p> <p>Localización: Calle del Río de la Plata</p> <p>Coordenadas (UTM): 419781,06 m E 6200570,77 m S Zona 21 H</p>	
<p>Tipo de pozo: Semisurgente</p> <p>Profundidad total de pozo (m): 32,0</p> <p>Nivel estático (m): 5,19</p> <p>Caudal (m³/h): 6,0</p> <p>Litología alcanzada: Sedimentario, Formación Raigón</p>	

PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS: Medición in situ. Fecha de muestreo: 08/06/2021



Parámetros fisicoquímicos	Valor	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]
pH	7,4	6,5 – 8,5
Eh [mV]	196,5	-
Oxígeno disuelto [ppm]	4,83	-
Conductividad [μS/cm]	628,0	2000
Sólidos totales disueltos [ppm]	314,0	1000
Turbidez [FNU]	0,1	1,0
Temperatura [° C]	17,05	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICO: Fecha de muestreo: 12/08/2021 Hora: 09.50

Elemento Químico [mg/L]	Valor [mg/L]	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]	OMS (2021) Valor sugerido [mg/L]
Dureza Total [mg CaCO ₃ /L]	165,4	500	-
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	370,88	-	-
Cloruros (Cl ⁻)	10,3855	250	1000
Nitratos (NO ₃ ²⁻)	19,3179	50	75
Sulfatos (SO ₄ ⁻)	10,9352	400	800
Sodio (Na ⁺)	32,4134	200	400
Potasio (K ⁺)	2,4167	-	50
Magnesio (Mg ²⁺)	2,4818	-	1000
Calcio (Ca ²⁺)	7,1904	-	500
Arsénico Total (As)	0,018	0,02	0,5
Arseniato (As V)	0,015	-	-
Arsenito (As III)	0,003	-	-
Alcalinidad [mg CaCO ₃ /L]	304,0	-	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO: Fecha de muestreo: 12/08/2021 Hora: 09.50

Parámetro	CASP20	Valor permitido	Métodos
CT ufc/100 mL	8	<1 ufc/100 mL	APHA 23 ^a Ed. SM 9222 B
CF ufc/100 mL	<1	<1 ufc/100 mL	APHA 23 ^a Ed. SM 9222 D
Ps. aeruginosa ufc/100mL	18	< 1 ufc/100 mL	UNIT 943:1994
Heterotróficos 35 °C ufc/mL	290	<= 500 ufc/mL	FM/APHA 9215 D 2005

<p>CÓDIGO DE POZO: CASP21</p> <p>Localización: 4 de Febrero</p> <p>Coordenadas (UTM): 419040,67 m E 6196571,15 m S Zona 21 H</p>	
<p>Tipo de pozo: Semisurgente</p> <p>Profundidad total de pozo (m): 15,0</p> <p>Nivel estático (m): Sin dato</p> <p>Caudal (m³/h): 15,0 (máximo)</p> <p>Litología alcanzada: Sedimentario, Formación Raigón</p>	

PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS: Medición in situ. No directo. Fecha de muestreo: 08/06/2021



Parámetros fisicoquímicos	Valor	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]
pH	7,15	6,5 – 8,5
Eh [mV]	195,6	-
Oxígeno disuelto [ppm]	5,01	-
Conductividad [μS/cm]	695,0	2000
Sólidos totales disueltos [ppm]	347,0	1000
Turbidez [FNU]	0,2	1,0
Temperatura [° C]	19,9	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICO: Fecha de muestreo: 11/08/2021 Hora: 11.10

Elemento Químico [mg/L]	Valor [mg/L]	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]	OMS (2021) Valor sugerido [mg/L]
Dureza Total [mg CaCO ₃ /L]	281,0	500	-
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	387,96	-	-
Cloruros (Cl ⁻)	6,9419	250	1000
Nitratos (NO ₃ ²⁻)	24,6479	50	75
Sulfatos (SO ₄ ⁻)	8,6744	400	800
Sodio (Na ⁺)	94,6597	200	400
Potasio (K ⁺)	0,0200	-	50
Magnesio (Mg ²⁺)	0,3217	-	1000
Calcio (Ca ²⁺)	17,8734	-	500
Arsénico Total (As)	0,021	0,02	0,5
Arseniato (As V)	0,019	-	-
Arsenito (As III)	0,002	-	-
Alcalinidad [mg CaCO ₃ /L]	318,0	-	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO: Fecha de muestreo: 11/08/2021 Hora: 11.10

Parámetro	CASP21	Valor permitido	Métodos
CT ufc/100 mL	<1	<1 ufc/100 mL	APHA 23 ^a Ed. SM 9222 B
CF ufc/100 mL	<1	<1 ufc/100 mL	APHA 23 ^a Ed. SM 9222 D
Ps. aeruginosa ufc/100mL	<1	< 1ufc/100 mL	UNIT 943:1994
Heterotróficos 35 °C ufc/mL	50	<= 500 ufc/mL	FM/APHA 9215 D 2005

<p>CÓDIGO DE POZO: CASP22</p> <p>Localización: Ruta 83</p> <p>Coordenadas (UTM): 422722,13 m E 6201496,89 m S Zona 21 H</p>	
<p>Tipo de pozo: Semisurgente</p> <p>Profundidad total de pozo (m): 32,0</p> <p>Nivel estático (m): 2,64</p> <p>Caudal (m³/h): Sin dato</p> <p>Litología alcanzada: Sedimentario, Formación Raigón</p>	

PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS: Medición in situ. Fecha de muestreo: 26/05/2021



Parámetros fisicoquímicos	Valor	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]
pH	7,08	6,5 – 8,5
Eh [mV]	221,4	-
Oxígeno disuelto [ppm]	2,83	-
Conductividad [μ S/cm]	809,0	2000
Sólidos totales disueltos [ppm]	405,0	1000
Turbidez [FNU]	0,5	1,0
Temperatura [° C]	17,71	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICO: Fecha de muestreo: 11/08/2021

Elemento Químico [mg/L]	Valor [mg/L]	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]	OMS (2021) Valor sugerido [mg/L]
Dureza Total [mg CaCO ₃ /L]	474,3	500	-
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	520,94	-	-
Cloruros (Cl ⁻)	40,9067	250	1000
Nitratos (NO ₃ ²⁻)	9,6390	50	75
Sulfatos (SO ₄ ⁻)	26,4654	400	800
Sodio (Na ⁺)	23,5455	200	400
Potasio (K ⁺)	17,3766	-	50
Magnesio (Mg ²⁺)	17,2907	-	1000
Calcio (Ca ²⁺)	32,3182	-	500
Arsénico Total (As)	0,014	0,02	0,5
Arseniato (As V)	0,009	-	-
Arsenito (As III)	0,005	-	-
Alcalinidad [mg CaCO ₃ /L]	427,0	-	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO: Fecha de muestreo: 11/08/2021

Parámetro	CASP22	Valor permitido	Métodos
CT ufc/100 mL	>160	<1 ufc/100 mL	APHA 23ª Ed. SM 9222 B
CF ufc/100 mL	>120	<1 ufc/100 mL	APHA 23ª Ed. SM 9222 D
Ps. aeruginosa ufc/100mL	<1	< 1 ufc/100 mL	UNIT 943:1994
Heterotróficos 35 °C ufc/mL	910	<= 500 ufc/mL	FM/APHA 9215 D 2005

<p>CÓDIGO DE POZO: CASP23</p> <p>Localización: Ruta 83</p> <p>Coordenadas (UTM): 423516,59 m E 6204415,66 m S Zona 21 H</p>	
<p>Tipo de pozo: Semisurgente</p> <p>Profundidad total de pozo (m): 26,0</p> <p>Nivel estático (m): Sin dato</p> <p>Caudal (m³/h): 2,5</p> <p>Litología alcanzada: Sedimentario, Formación Raigón</p>	

PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS: Medición in situ. Fecha de muestreo: 09/06/2021

Parámetros fisicoquímicos	Valor	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]
pH	6,98	6,5 – 8,5
Eh [mV]	215,4	-
Oxígeno disuelto [ppm]	5,63	-
Conductividad [μ S/cm]	975,0	2000
Sólidos totales disueltos [ppm]	487,0	1000
Turbidez [FNU]	0	1,0
Temperatura [° C]	19,42	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICO: Fecha de muestreo: 11/08/2021 Hora: 13.56

Elemento Químico [mg/L]	Valor [mg/L]	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]	OMS (2021) Valor sugerido [mg/L]
Dureza Total [mg CaCO ₃ /L]	480,3	500	-
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	466,04	-	-
Cloruros (Cl ⁻)	No detectable	250	1000
Nitratos (NO ₃ ²⁻)	No detectable	50	75
Sulfatos (SO ₄ ⁻)	No detectable	400	800
Sodio (Na ⁺)	15,9432	200	400
Potasio (K ⁺)	13,4635	-	50
Magnesio (Mg ²⁺)	14,2679	-	1000
Calcio (Ca ²⁺)	20,8699	-	500
Arsénico Total (As)	0,011	0,02	0,5
Arseniato (As V)	0,008	-	-
Arsenito (As III)	0,002	-	-
Alcalinidad [mg CaCO ₃ /L]	382,0	-	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO: Fecha de muestreo: 11/08/2021 Hora: 13.58

Parámetro	CASP23	Valor permitido	Métodos
CT ufc/100 mL	<1	<1 ufc/100 mL	APHA 23ª Ed. SM 9222 B
CF ufc/100 mL	<1	<1 ufc/100 mL	APHA 23ª Ed. SM 9222 D
Ps. aeruginosa ufc/100mL	<1	< 1ufc/100 mL	UNIT 943:1994
Heterotróficos 35 °C ufc/mL	100	<= 500 ufc/mL	FM/APHA 9215 D 2005

<p>CÓDIGO DE POZO: CASP24</p> <p>Localización: Camino Jorge Neme</p> <p>Coordenadas (UTM): 419809,51 m E 6197762,85 m S Zona 21 H</p>	
<p>Tipo de pozo: Semisurgente</p> <p>Profundidad total de pozo (m): 18,0</p> <p>Nivel estático (m): Sin dato</p> <p>Caudal (m³/h): Sin dato</p> <p>Litología alcanzada: Sedimentario, Formación Raigón</p>	

PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS: Medición in situ. Fecha de muestreo: 09/06/2021


Parámetros fisicoquímicos	Valor	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]
pH	7,12	6,5 – 8,5
Eh [mV]	214,6	-
Oxígeno disuelto [ppm]	6,2	-
Conductividad [μ S/cm]	602,0	2000
Sólidos totales disueltos [ppm]	301,0	1000
Turbidez [FNU]	0,1	1,0
Temperatura [° C]	18,89	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICO: Fecha de muestreo: 11/08/2021 Hora: 10.55

Elemento Químico [mg/L]	Valor [mg/L]	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]	OMS (2021) Valor sugerido [mg/L]
Dureza Total [mg CaCO ₃ /L]	225,2	500	-
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	309,88	-	-
Cloruros (Cl ⁻)	14,5666	250	1000
Nitratos (NO ₃ ²⁻)	20,1673	50	75
Sulfatos (SO ₄ ⁻)	15,5322	400	800
Sodio (Na ⁺)	12,3549	200	400
Potasio (K ⁺)	13,0422	-	50
Magnesio (Mg ²⁺)	9,7082	-	1000
Calcio (Ca ²⁺)	5,0149	-	500
Arsénico Total (As)	0,017	0,02	0,5
Arseniato (As V)	0,015	-	-
Arsenito (As III)	0,002	-	-
Alcalinidad [mg CaCO ₃ /L]	254,0	-	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO: Fecha de muestreo: 11/08/2021 Hora: 10.55

Parámetro	CASP24	Valor permitido	Métodos
CT ufc/100 mL	<1	<1 ufc/100 mL	APHA 23 ^a Ed. SM 9222 B
CF ufc/100 mL	<1	<1 ufc/100 mL	APHA 23 ^a Ed. SM 9222 D
Ps. aeruginosa ufc/100mL	<1	< 1ufc/100 mL	UNIT 943:1994
Heterotróficos 35 °C ufc/mL	50	<= 500 ufc/mL	FM/APHA 9215 D 2005

<p>CÓDIGO DE POZO: CASP25</p> <p>Localización: camino sin denominación, a 1,3 km de Ruta 83</p> <p>Coordenadas (UTM): 426346,33 m E 6209162,44 m S Zona 21 H</p>	
<p>Tipo de pozo: Surgente</p> <p>Profundidad total de pozo (m): Sin dato</p> <p>Nivel estático (m): Sin dato</p> <p>Caudal (m³/h): 3,0</p> <p>Litología alcanzada: Fracturado, granito</p>	

PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS: Medición in situ. Fecha de muestreo: 08/06/2021

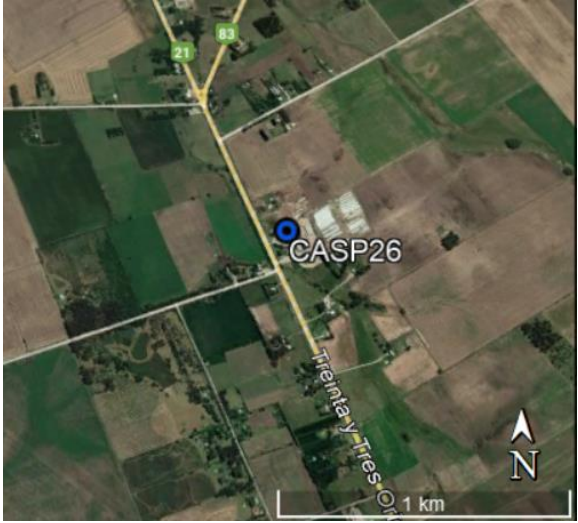
Parámetros fisicoquímicos	Valor	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]
pH	7,11	6,5 – 8,5
Eh [mV]	192,6	-
Oxígeno disuelto [ppm]	6,5	-
Conductividad [μ S/cm]	863,0	2000
Sólidos totales disueltos [ppm]	432,0	1000
Turbidez [FNU]	0,2	1,0
Temperatura [° C]	17,21	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICO: Fecha de muestreo: 12/08/2021 Hora: 09.33

Elemento Químico [mg/L]	Valor [mg/L]	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]	OMS (2021) Valor sugerido [mg/L]
Dureza Total [mg CaCO ₃ /L]	346,8	500	-
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	540,46	-	-
Cloruros (Cl ⁻)	37,0084	250	1000
Nitratos (NO ₃ ²⁻)	56,6389	50	75
Sulfatos (SO ₄ ⁻)	11,3923	400	800
Sodio (Na ⁺)	27,5704	200	400
Potasio (K ⁺)	1,0849	-	50
Magnesio (Mg ²⁺)	8,1494	-	1000
Calcio (Ca ²⁺)	33,3126	-	500
Arsénico Total (As)	0,011	0,02	0,5
Arseniato (As V)	0,009	-	-
Arsenito (As III)	0,003	-	-
Alcalinidad [mg CaCO ₃ /L]	443,0	-	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO: Fecha de muestreo: 12/08/2021 Hora: 09.36

Parámetro	CASP25	Valor permitido	Métodos
CT ufc/100 mL	22	<1 ufc/100 mL	APHA 23ª Ed. SM 9222 B
CF ufc/100 mL	2	<1 ufc/100 mL	APHA 23ª Ed. SM 9222 D
Ps. aeruginosa ufc/100mL	<1	< 1ufc/100 mL	UNIT 943:1994
Heterotróficos 35 °C ufc/mL	690	<= 500 ufc/mL	FM/APHA 9215 D 2005

<p>CÓDIGO DE POZO: CASP26</p> <p>Localización: Ruta 21, km, 188,5</p> <p>Coordenadas (UTM): 421837,24 m E 6197906,04 m S Zona 21 H</p>	
<p>Tipo de pozo: Brocal</p> <p>Profundidad total de pozo (m): Sin dato</p> <p>Nivel estático (m): Sin dato</p> <p>Caudal (m³/h): Sin dato</p> <p>Litología alcanzada: Sedimentario, Formación Raigón</p>	

RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICO: Fecha de muestreo: 11/08/2021 Hora: 09.35

Elemento Químico [mg/L]	Valor [mg/L]	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]	OMS (2021) Valor sugerido [mg/L]
Dureza Total [mg CaCO ₃ /L]	374,7	500	-
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	427,0	-	-
Cloruros (Cl ⁻)	23,0666	250	1000
Nitratos (NO ₃ ²⁻)	30,0384	50	75
Sulfatos (SO ₄ ⁻)	13,7125	400	800
Sodio (Na ⁺)	12,2724	200	400
Potasio (K ⁺)	4,3202	-	50
Magnesio (Mg ²⁺)	6,9455	-	1000
Calcio (Ca ²⁺)	14,4971	-	500
Arsénico Total (As)	0,014	0,02	0,5
Arseniato (As V)	0,011	-	-
Arsenito (As III)	0,003	-	-
Alcalinidad [mg CaCO ₃ /L]	350,0	-	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO: Fecha de muestreo: 11/08/2021 Hora: 09.35

Parámetro	CASP26	Valor permitido	Métodos
CT ufc/100 mL	34	<1 ufc/100 mL	APHA 23ª Ed. SM 9222 B
CF ufc/100 mL	<1	<1 ufc/100 mL	APHA 23ª Ed. SM 9222 D
Ps. aeruginosa ufc/100mL	<1	< 1ufc/100 mL	UNIT 943:1994
Heterotróficos 35 °C ufc/mL	2000	<= 500 ufc/mL	FM/APHA 9215 D 2005

<p>CÓDIGO DE POZO: CASP27</p> <p>Localización: Camino 18 de Julio</p> <p>Coordenadas (UTM): 421851,25 m E 6198399,64 m S Zona 21 H</p> <p>Tipo de pozo: Surgente</p> <p>Profundidad total de pozo (m): Sin dato</p> <p>Nivel estático (m): Sin dato</p> <p>Caudal (m³/h): Sin dato</p> <p>Litología alcanzada: Fracturado, granito</p>	
--	--

PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS: Medición in situ. Fecha de muestreo: 14/08/2021

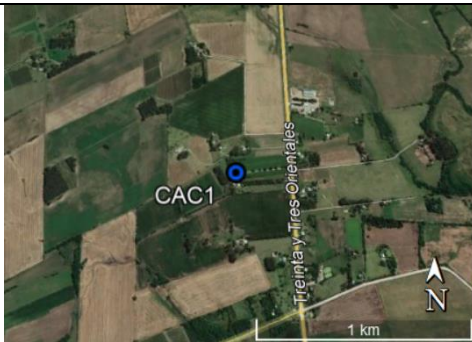

Parámetros fisicoquímicos	Valor	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]
pH	7,34	6,5 – 8,5
Eh [mV]	140,3	-
Oxígeno disuelto [ppm]	2,71	-
Conductividad [µS/cm]	1365,0	2000
Sólidos totales disueltos [ppm]	685,0	1000
Turbidez [FNU]	1,4	1,0
Temperatura [° C]	14,51	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICO: Fecha de muestreo: 12/08/2021 Hora: 12.33

Elemento Químico [mg/L]	Valor [mg/L]	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]	OMS (2021) Valor sugerido [mg/L]
Dureza Total [mg CaCO ₃ /L]	279,0	500	-
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	314,76	-	-
Cloruros (Cl ⁻)	3,0388	250	1000
Nitratos (NO ₃ ²⁻)	21,3689	50	75
Sulfatos (SO ₄ ⁻)	4,5495	400	800
Sodio (Na ⁺)	3,5709	200	400
Potasio (K ⁺)	2,8097	-	50
Magnesio (Mg ²⁺)	2,4108	-	1000
Calcio (Ca ²⁺)	12,6877	-	500
Arsénico Total (As)	0,017	0,02	0,5
Arseniato (As V)	0,014	-	-
Arsenito (As III)	0,003	-	-
Alcalinidad [mg CaCO ₃ /L]	258,0	-	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO: Fecha de muestreo: 12/08/2021 Hora: 12.35

Parámetro	CASP27	Valor permitido	Métodos
CT ufc/100 mL	>160	<1 ufc/100 mL	APHA 23 ^a Ed. SM 9222 B
CF ufc/100 mL	2	<1 ufc/100 mL	APHA 23 ^a Ed. SM 9222 D
Ps. aeruginosa ufc/100mL	>400	< 1ufc/100 mL	UNIT 943:1994
Heterotróficos 35 °C ufc/mL	1900	<= 500 ufc/mL	FM/APHA 9215 D 2005

<p>CÓDIGO DE POZO: CAC1</p> <p>Localización: Ruta 21</p> <p>Coordenadas (UTM): 422058,56 m E 6193922,37 m S Zona 21 H</p>	
<p>Tipo de pozo: Brocal</p> <p>Profundidad total de pozo (m): 27,36</p> <p>Nivel estático (m): 19,77</p> <p>Caudal (m³/h): Sin dato</p> <p>Litología alcanzada: Sedimentario, Formación Raigón</p>	

PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS: Medición in situ. Fecha de muestreo: 28/05/2021

Parámetros fisicoquímicos	Valor	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]
pH	7,48	6,5 – 8,5
Eh [mV]	186,9	-
Oxígeno disuelto [ppm]	4,76	-
Conductividad [μ S/cm]	796,0	2000
Sólidos totales disueltos [ppm]	398,0	1000
Turbidez [FNU]	0,4	1,0
Temperatura [° C]	18,76	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICO: Fecha de muestreo: 11/08/2021 Hora: 13.29

Elemento Químico [mg/L]	Valor [mg/L]	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]	OMS (2021) Valor sugerido [mg/L]
Dureza Total [mg CaCO ₃ /L]	221,2	500	-
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	552,66	-	-
Cloruros (Cl ⁻)	29,7820	250	1000
Nitratos (NO ₃ ²⁻)	60,5547	50	75
Sulfatos (SO ₄ ⁻)	22,6948	400	800
Sodio (Na ⁺)	72,9390	200	400
Potasio (K ⁺)	2,9267	-	50
Magnesio (Mg ²⁺)	3,1757	-	1000
Calcio (Ca ²⁺)	9,6613	-	500
Arsénico Total (As)	0,023	0,02	0,5
Arseniato (As V)	0,018	-	-
Arsenito (As III)	0,005	-	-
Alcalinidad [mg CaCO ₃ /L]	453,0	-	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO: Fecha de muestreo: 11/08/2021 Hora: 13.29

Parámetro	CAC1	Valor permitido	Métodos
CT ufc/100 mL	>160	<1 ufc/100 mL	APHA 23ª Ed. SM 9222 B
CF ufc/100 mL	<1	<1 ufc/100 mL	APHA 23ª Ed. SM 9222 D
Ps. aeruginosa ufc/100mL	<1	< 1ufc/100 mL	UNIT 943:1994
Heterotróficos 35 °C ufc/mL	>2000	<= 500 ufc/mL	FM/APHA 9215 D 2005

<p>CÓDIGO DE POZO: CAC2</p> <p>Localización: Ruta 21 y 26 de Febrero de 1912</p> <p>Coordenadas (UTM): 422487,51 m E 6195742,20 m S Zona 21 H</p>	
<p>Tipo de pozo: Brocal</p> <p>Profundidad total de pozo (m): Sin dato</p> <p>Nivel estático (m): 7,73</p> <p>Caudal (m³/h): Sin dato</p> <p>Litología alcanzada: Sedimentario, Formación Raigón</p>	

PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS: Medición in situ. Fecha de muestreo: 28/05/2021



Parámetros fisicoquímicos	Valor	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]
pH	7,52	6,5 – 8,5
Eh [mV]	169,3	-
Oxígeno disuelto [ppm]	4,54	-
Conductividad [µS/cm]	871,0	2000
Sólidos totales disueltos [ppm]	436,0	1000
Turbidez [FNU]	2,5	1,0
Temperatura [° C]	16,56	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICO: Fecha de muestreo: 11/08/2021 Hora: 15.26 (No directo)

Elemento Químico [mg/L]	Valor [mg/L]	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]	OMS (2021) Valor sugerido [mg/L]
Dureza Total [mg CaCO ₃ /L]	209,3	500	-
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	671,0	-	-
Cloruros (Cl ⁻)	45,1622	250	1000
Nitratos (NO ₃ ²⁻)	23,8793	50	75
Sulfatos (SO ₄ ⁻)	23,0566	400	800
Sodio (Na ⁺)	80,4547	200	400
Potasio (K ⁺)	1,1986	-	50
Magnesio (Mg ²⁺)	2,8861	-	1000
Calcio (Ca ²⁺)	4,3861	-	500
Arsénico Total (As)	0,021	0,02	0,5
Arseniato (As V)	0,017	-	-
Arsenito (As III)	0,003	-	-
Alcalinidad [mg CaCO ₃ /L]	550,0	-	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO: Fecha de muestreo: 11/08/2021 Hora: 15.26 (No directo)

Parámetro	CAC2	Valor permitido	Métodos
CT ufc/100 mL	>160	<1 ufc/100 mL	APHA 23 ^a Ed. SM 9222 B
CF ufc/100 mL	118	<1 ufc/100 mL	APHA 23 ^a Ed. SM 9222 D
Ps. aeruginosa ufc/100mL	<1	< 1ufc/100 mL	UNIT 943:1994
Heterotróficos 35 °C ufc/mL	>2000	<= 500 ufc/mL	FM/APHA 9215 D 2005

<p>CÓDIGO DE POZO: CAC3</p> <p>Localización: 2 de Marzo de 1914</p> <p>Coordenadas (UTM): 421002,17 m E 6194911,56 m S Zona 21 H</p>	
<p>Tipo de pozo: Semisurgente</p> <p>Profundidad total de pozo (m): Sin dato</p> <p>Nivel estático (m): 8,67</p> <p>Caudal (m³/h): Sin dato</p> <p>Litología alcanzada: Sedimentario, Formación Raigón</p>	



PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS: Sin datos, ausencia de bomba (Fecha: 08/06/21)

RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICO: Fecha de muestreo: 11/08/2021 Hora: 12.50

Elemento Químico [mg/L]	Valor [mg/L]	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]	OMS (2021) Valor sugerido [mg/L]
Dureza Total [mg CaCO ₃ /L]	271,0	500	-
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	309,88	-	-
Cloruros (Cl ⁻)	11,2047	250	1000
Nitratos (NO ₃ ²⁻)	9,5076	50	75
Sulfatos (SO ₄ ⁻)	9,2158	400	800
Sodio (Na ⁺)	7,0002	200	400
Potasio (K ⁺)	14,0325	-	50
Magnesio (Mg ²⁺)	10,1916	-	1000
Calcio (Ca ²⁺)	4,1918	-	500
Arsénico Total (As)	0,011	0,02	0,5
Arseniato (As V)	0,009	-	-
Arsenito (As III)	0,002	-	-
Alcalinidad [mg CaCO ₃ /L]	254,0	-	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO: Fecha de muestreo: 11/08/2021 Hora: 12.50

Parámetro	CAC3	Valor permitido	Métodos
CT ufc/100 mL	24	<1 ufc/100 mL	APHA 23ª Ed. SM 9222 B
CF ufc/100 mL	<1	<1 ufc/100 mL	APHA 23ª Ed. SM 9222 D
Ps. aeruginosa ufc/100mL	<1	< 1ufc/100 mL	UNIT 943:1994
Heterotróficos 35 °C ufc/mL	>2000	<= 500 ufc/mL	FM/APHA 9215 D 2005

<p>CÓDIGO DE POZO: CAC4</p> <p>Localización: Ruta 21 y 26 de Febrero de 1912</p> <p>Coordenadas (UTM): 422489,68 m E 6195849,41 m S Zona 21 H</p>	
<p>Tipo de pozo: Semisurgente</p> <p>Profundidad total de pozo (m): 27,0</p> <p>Nivel estático (m): 9,28</p> <p>Caudal (m³/h): 1,8</p> <p>Litología alcanzada: Sedimentario, Formación Raigón</p>	

PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS: Medición in situ. Fecha de muestreo: 28/05/2021



Parámetros fisicoquímicos	Valor	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]
pH	7,43	6,5 – 8,5
Eh [mV]	165,0	-
Oxígeno disuelto [ppm]	3,58	-
Conductividad [µS/cm]	867,0	2000
Sólidos totales disueltos [ppm]	433,0	1000
Turbidez [FNU]	0,2	1,0
Temperatura [° C]	18,85	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICO: Fecha de muestreo: 11/08/2021 Hora: 15.40

Elemento Químico [mg/L]	Valor [mg/L]	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]	OMS (2021) Valor sugerido [mg/L]
Dureza Total [mg CaCO ₃ /L]	177,4	500	-
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	588,04	-	-
Cloruros (Cl ⁻)	66,2156	250	1000
Nitratos (NO ₃ ²⁻)	0,1254	50	75
Sulfatos (SO ₄ ⁻)	27,2114	400	800
Sodio (Na ⁺)	30,1274	200	400
Potasio (K ⁺)	13,8217	-	50
Magnesio (Mg ²⁺)	9,1757	-	1000
Calcio (Ca ²⁺)	1,2634	-	500
Arsénico Total (As)	0,030	0,02	0,5
Arseniato (As V)	0,024	-	-
Arsenito (As III)	0,006	-	-
Alcalinidad [mg CaCO ₃ /L]	482,0	-	-



RESULTADOS DE ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO: Fecha de muestreo: 11/08/2021 Hora: 15.40

Parámetro	CAC4	Valor permitido	Métodos
CT ufc/100 mL	<1	<1 ufc/100 mL	APHA 23 ^a Ed. SM 9222 B
CF ufc/100 mL	<1	<1 ufc/100 mL	APHA 23 ^a Ed. SM 9222 D
Ps. aeruginosa ufc/100mL	<1	< 1ufc/100 mL	UNIT 943:1994
Heterotróficos 35 °C ufc/mL	1800	<= 500 ufc/mL	FM/APHA 9215 D 2005

<p>CÓDIGO DE POZO: CAC5</p> <p>Localización: Ruta 21 y 26 de Febrero de 1912</p> <p>Coordenadas (UTM): 422478,68 m E 6195852,10 m S Zona 21 H</p>	
<p>Tipo de pozo: Brocal</p> <p>Profundidad total de pozo (m): 12,54</p> <p>Nivel estático (m): 9,49</p> <p>Caudal (m³/h): Sin dato</p> <p>Litología alcanzada: Sedimentario, Formación Raigón</p>	

PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS: Medición in situ. Fecha de muestreo: 28/05/2021

Parámetros fisicoquímicos	Valor	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]
pH	7,58	6,5 – 8,5
Eh [mV]	184,6	-
Oxígeno disuelto [ppm]	3,82	-
Conductividad [μS/cm]	1092,0	2000
Sólidos totales disueltos [ppm]	546,0	1000
Turbidez [FNU]	0,2	1,0
Temperatura [°C]	18,1	-

<p>CÓDIGO DE POZO: CAC6</p> <p>Localización: Ruta 21, km 185</p> <p>Coordenadas (UTM): 421958,23 m E 6194620,80 m S Zona 21 H</p>	
<p>Tipo de pozo: Brocal</p> <p>Profundidad total de pozo (m): 12,53</p> <p>Nivel estático (m): 7,83</p> <p>Caudal (m³/h): Sin dato</p> <p>Litología alcanzada: Sedimentario, Formación Raigón</p>	

PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS: Medición in situ. Fecha de muestreo: 28/05/2021



Parámetros fisicoquímicos	Valor	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]
pH	7,48	6,5 – 8,5
Eh [mV]	169,1	-
Oxígeno disuelto [ppm]	5,0	-
Conductividad [μ S/cm]	1181,0	2000
Sólidos totales disueltos [ppm]	590,0	1000
Turbidez [FNU]	0,3	1,0
Temperatura [° C]	15,35	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICO: Fecha de muestreo: 11/08/2021 Hora: 13.50

Elemento Químico [mg/L]	Valor [mg/L]	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]	OMS (2021) Valor sugerido [mg/L]
Dureza Total [mg CaCO ₃ /L]	613,8	500	-
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	549,0	-	-
Cloruros (Cl ⁻)	107,7378	250	1000
Nitratos (NO ₃ ²⁻)	192,6781	50	75
Sulfatos (SO ₄ ⁻)	73,9157	400	800
Sodio (Na ⁺)	35,1252	200	400
Potasio (K ⁺)	6,4023	-	50
Magnesio (Mg ²⁺)	16,0648	-	1000
Calcio (Ca ²⁺)	10,9569	-	500
Arsénico Total (As)	0,014	0,02	0,5
Arseniato (As V)	0,012	-	-
Arsenito (As III)	0,002	-	-
Alcalinidad [mg CaCO ₃ /L]	450,0	-	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO: Fecha de muestreo: 11/08/2021 Hora: 13.50

Parámetro	CAC6	Valor permitido	Métodos
CT ufc/100 mL	>160	<1 ufc/100 mL	APHA 23ª Ed. SM 9222 B
CF ufc/100 mL	36	<1 ufc/100 mL	APHA 23ª Ed. SM 9222 D
Ps. aeruginosa ufc/100mL	<1	< 1ufc/100 mL	UNIT 943:1994
Heterotróficos 35 °C ufc/mL	1720	<= 500 ufc/mL	FM/APHA 9215 D 2005

<p>CÓDIGO DE POZO: CAC7</p> <p>Localización: 26 de Febrero de 1912</p> <p>Coordenadas (UTM): 423467,58 m E 6196170,77 m S Zona 21 H</p>	
<p>Tipo de pozo: Brocal</p> <p>Profundidad total de pozo (m): 21,02</p> <p>Nivel estático (m): 16,53</p> <p>Caudal (m³/h): Sin dato</p> <p>Litología alcanzada: Sedimentario, Formación Raigón</p>	

PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS: Medición in situ. Fecha de muestreo: 09/06/2021



Parámetros fisicoquímicos	Valor	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]
pH	7,39	6,5 – 8,5
Eh [mV]	188,2	-
Oxígeno disuelto [ppm]	3,94	-
Conductividad [μ S/cm]	1296,0	2000
Sólidos totales disueltos [ppm]	648,0	1000
Turbidez [FNU]	0,3	1,0
Temperatura [° C]	19,36	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICO: Fecha de muestreo: 12/08/2021

Elemento Químico [mg/L]	Valor [mg/L]	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]	OMS (2021) Valor sugerido [mg/L]
Dureza Total [mg CaCO ₃ /L]	181,4	500	-
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	677,1	-	-
Cloruros (Cl ⁻)	45,0501	250	1000
Nitratos (NO ₃ ²⁻)	47,7506	50	75
Sulfatos (SO ₄ ⁻)	40,4666	400	800
Sodio (Na ⁺)	94,9440	200	400
Potasio (K ⁺)	0,5229	-	50
Magnesio (Mg ²⁺)	0,9222	-	1000
Calcio (Ca ²⁺)	2,4676	-	500
Arsénico Total (As)	0,018	0,02	0,5
Arseniato (As V)	0,014	-	-
Arsenito (As III)	0,004	-	-
Alcalinidad [mg CaCO ₃ /L]	555,0	-	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO: Fecha de muestreo: 12/08/2021

Parámetro	CAC7	Valor permitido	Métodos
CT ufc/100 mL	>160	<1 ufc/100 mL	APHA 23ª Ed. SM 9222 B
CF ufc/100 mL	<1	<1 ufc/100 mL	APHA 23ª Ed. SM 9222 D
Ps. aeruginosa ufc/100mL	<1	< 1ufc/100 mL	UNIT 943:1994
Heterotróficos 35 °C ufc/mL	910	<= 500 ufc/mL	FM/APHA 9215 D 2005

<p>CÓDIGO DE POZO: CAC8</p> <p>Localización: Ruta 21, km 184</p> <p>Coordenadas (UTM): 422321,22 m E 6192893,22 m S Zona 21 H</p>	
<p>Tipo de pozo: Brocal</p> <p>Profundidad total de pozo (m): 3,9</p> <p>Nivel estático (m): 1,69</p> <p>Caudal (m³/h): Sin dato</p> <p>Litología alcanzada: Sedimentario, Formación Raigón</p>	

PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS: Medición in situ. Fecha de muestreo: 28/05/2021


Parámetros fisicoquímicos	Valor	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]
pH	7,34	6,5 – 8,5
Eh [mV]	193,2	-
Oxígeno disuelto [ppm]	3,42	-
Conductividad [μ S/cm]	472,0	2000
Sólidos totales disueltos [ppm]	236,0	1000
Turbidez [FNU]	0,7	1,0
Temperatura [° C]	18,54	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICO: Fecha de muestreo: 12/08/2021

Elemento Químico [mg/L]	Valor [mg/L]	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]	OMS (2021) Valor sugerido [mg/L]
Dureza Total [mg CaCO ₃ /L]	261,1	500	-
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	367,22	-	-
Cloruros (Cl ⁻)	6,1998	250	1000
Nitratos (NO ₃ ²⁻)	13,2110	50	75
Sulfatos (SO ₄ ⁻)	9,3057	400	800
Sodio (Na ⁺)	14,9402	200	400
Potasio (K ⁺)	4,0278	-	50
Magnesio (Mg ²⁺)	3,2233	-	1000
Calcio (Ca ²⁺)	17,3363	-	500
Arsénico Total (As)	0,013	0,02	0,5
Arseniato (As V)	0,011	-	-
Arsenito (As III)	0,002	-	-
Alcalinidad [mg CaCO ₃ /L]	301,0	-	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO: Fecha de muestreo: 12/08/2021

Parámetro	CAC8	Valor permitido	Métodos
CT ufc/100 mL	>160	<1 ufc/100 mL	APHA 23ª Ed. SM 9222 B
CF ufc/100 mL	>120	<1 ufc/100 mL	APHA 23ª Ed. SM 9222 D
Ps. aeruginosa ufc/100mL	<1	< 1ufc/100 mL	UNIT 943:1994
Heterotróficos 35 °C ufc/mL	390	<= 500 ufc/mL	FM/APHA 9215 D 2005

<p>CÓDIGO DE POZO: CAC9</p> <p>Localización: Camino a la Cárcel</p> <p>Coordenadas (UTM): 425797,40 m E 6194806,16 m S Zona 21 H</p>	
<p>Tipo de pozo: Surgente</p> <p>Profundidad total de pozo (m): Sin dato</p> <p>Nivel estático (m): Sin dato</p> <p>Caudal (m³/h): Sin dato</p> <p>Litología alcanzada: Fracturado, granito</p>	

PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS: Medición in situ. Fecha de muestreo: 14/08/2021

Parámetros fisicoquímicos	Valor	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]
pH	7,29	6,5 – 8,5
Eh [mV]	143,7	-
Oxígeno disuelto [ppm]	3,52	-
Conductividad [μ S/cm]	1338,0	2000
Sólidos totales disueltos [ppm]	669,0	1000
Turbidez [FNU]	1,6	1,0
Temperatura [° C]	14,18	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICO: Fecha de muestreo: 12/08/2021 Hora: 13.04

Elemento Químico [mg/L]	Valor [mg/L]	Norma UNIT 833:2008 Valor máximo permitido [mg/L]	OMS (2021) Valor sugerido [mg/L]
Dureza Total [mg CaCO ₃ /L]	287,0	500	-
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	530,7	-	-
Cloruros (Cl ⁻)	122,3619	250	1000
Nitratos (NO ₃ ²⁻)	21,5084	50	75
Sulfatos (SO ₄ ⁻)	17,5584	400	800
Sodio (Na ⁺)	87,5264	200	400
Potasio (K ⁺)	0,2891	-	50
Magnesio (Mg ²⁺)	0,5259	-	1000
Calcio (Ca ²⁺)	17,9955	-	500
Arsénico Total (As)	0,015	0,02	0,5
Arseniato (As V)	0,012	-	-
Arsenito (As III)	0,003	-	-
Alcalinidad [mg CaCO ₃ /L]	435,0	-	-

RESULTADOS DE ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO: Fecha de muestreo: 12/08/2021 Hora: 13.04

Parámetro	CAC9	Valor permitido	Métodos
CT ufc/100 mL	>160	<1 ufc/100 mL	APHA 23 ^a Ed. SM 9222 B
CF ufc/100 mL	66	<1 ufc/100 mL	APHA 23 ^a Ed. SM 9222 D
Ps. aeruginosa ufc/100mL	<1	< 1ufc/100 mL	UNIT 943:1994
Heterotróficos 35 °C ufc/mL	>2000	<= 500 ufc/mL	FM/APHA 9215 D 2005

Anexo VI. Comentarios

Trabajo presentado en forma oral el 8 de noviembre de 2022 en el II Simposio de Arsénico en Agua Subterránea del Uruguay, titulado “*ARSÉNICO EN AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LAS CUENCAS ARROYO SAN PEDRO Y ARROYO DE LA CABALLADA, SAN PEDRO, COLONIA*” en el marco del X Congreso Uruguayo de Geología.

ARSÉNICO EN AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LAS CUENCAS ARROYO SAN PEDRO Y ARROYO DE LA CABALLADA, SAN PEDRO, COLONIA

Strambini Ruiz, M. V.; Collazo Caraballo, M. P.

Recursos Hídricos Subterráneos. Instituto de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias, UdelAR
virginia.stram@gmail.com, mpaula@fcien.edu.uy

RESUMEN

El agua subterránea es un recurso de vital importancia, utilizándose para el consumo humano, animal y para el riego, sin embargo, elevadas concentraciones de arsénico limitan su uso, convirtiéndola en no potable. Una investigación en la localidad de San Pedro, Departamento de Colonia, financiada por la Cooperativa Agraria Suplementada San Pedro (CASSPE) en el marco de “Proyecto Más Agua” del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP), determinó, concentraciones de arsénico por encima de los valores máximos permitidos por la Organización Mundial de la Salud (0,010 mg/L) y por la Norma de potabilidad uruguaya UNIT 833:2008 (0,020 mg/L). La actividad principal en la zona es la producción lechera y la agricultura, actividades que demandan gran cantidad de agua subterránea de calidad. Los principales acuíferos y los que se utilizan para satisfacer dichas demandas, son: un acuífero fracturado, correspondiente a granitos de edad Paleoproterozoica, y un acuífero sedimentario, integrado por la Formación Raigón. Ambos acuíferos fueron muestreados en las siguientes fechas: 11 y 12 de agosto de 2021, para caracterizar químicamente las aguas subterráneas y evaluar la distribución de las concentraciones de arsénico y como se relaciona con la conductividad. Del análisis de los resultados químicos (33), se deduce que el agua subterránea del acuífero fracturado y sedimentario se clasifica como bicarbonatada sódica-cálcica, presentando ambos acuíferos un valor medio de arsénico de 0,017 mg/L, con un valor máximo de 0,034 mg/L y 0,03 mg/L, respectivamente. A partir del análisis de datos, se concluye que el 27% de los pozos presenta valores que superan la norma actual del Uruguay y que el 91% de los pozos superan la norma de calidad de agua potable de la OMS. Estos datos muestran la importancia de la investigación en una zona donde nunca se había realizado análisis de arsénico, exponiendo la vulnerabilidad y el riesgo al que están expuestos los pobladores.

Palabras clave: Arsénico en agua subterránea, San Pedro, Colonia.



Trabajo presentado en forma de póster el 8 de noviembre de 2022 en el II Simposio de Arsénico en Agua Subterránea del Uruguay, titulado “*ESTUDIO DE LOS NIVELES DE ARSÉNICO EN AGUAS SUBTERRÁNEAS UTILIZADAS PARA EL CONSUMO HUMANO; APORTES DE LA TOXICOLOGÍA AMBIENTAL CON UNA MIRADA DE GEOLOGÍA MÉDICA*” en el marco del X Congreso Uruguayo de Geología.

NIVELES DE ARSÉNICO EN AGUAS SUBTERRÁNEAS UTILIZADAS PARA EL CONSUMO HUMANO EN SAN PEDRO, COLONIA; APORTES DE LA TOXICOLOGÍA AMBIENTAL CON UNA MIRADA DE GEOLOGÍA MÉDICA

Pizzorno, P.^{a*}; Bühl, V.^b; Strambini, V.^c; Collazo, P.^c; Mañay, N.^a

^a Centro Especializado en Química Toxicológica (CEQUIMTOX), Área Toxicología. DEC. Facultad de Química, Universidad de la República. Montevideo - Uruguay

^b Grupo de Bioanálisis y Especiación (BIOESP), Área Química Analítica, DEC. Facultad de Química, Universidad de la República. Montevideo - Uruguay

^c Instituto de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias, Universidad de la República. Montevideo - Uruguay
*ppizzorno@fq.edu.uy

Introducción

La calidad de las aguas subterráneas ha sido foco de estudios de investigación multidisciplinaria en Geología Médica en Uruguay, siendo el arsénico (As) una de sus principales preocupaciones para los impactos en la salud. En Uruguay, el agua potable es suministrada aproximadamente al 94% de la población por OSE. Sin embargo, algunas zonas rurales no tienen acceso a la red y la gente bebe agua de sus propios pozos, que no son controlados adecuadamente, con el potencial riesgo para la salud de esa población consumidora.



Objetivo

El objetivo de este trabajo es determinar los niveles de As en las aguas subterráneas de la Localidad de San Pedro en Colonia. Para posteriormente investigar la asociación entre la exposición al As a través del agua utilizada para consumo y los efectos adversos para la salud mediante un enfoque multidisciplinario de la Geología Médica.

Metodología



El estudio se realizó en la localidad de San Pedro en Colonia, donde se estudiaron los niveles de As en 38 pozos privados. Se realizó una encuesta orientada a los propietarios.

El riesgo estuvo representado por el cociente de peligro (HQ) y el riesgo de cáncer (CR). Se estimó la HQ para las manifestaciones dermatológicas, utilizando como toxicidad la dosis de referencia de 0,0003 mg/kg/día para manifestaciones.

$HQ = ADD / RID$. La situación de riesgo para la salud se asumió cuando los niveles de HQ fueron >1.

El riesgo de cáncer (CR) se calculó utilizando el factor de pendiente del cáncer de 1,5 mg/kg/día⁻¹ (IRIS, 1998). $CR = ADD \times CSF \times ADAF$. Los valores entre 10⁻⁴ y 10⁻⁶ se consideran seguros (IRIS, 1998).

Se estimó el riesgo a la salud asociado con el consumo crónico de agua con altas concentraciones de arsénico en niños y adultos. El riesgo para la salud se estimó con la frecuencia de exposición y la duración de la exposición. Los niveles de As en agua se utilizaron para calcular la dosis diaria promedio (ADD) $ADD = \frac{C \cdot IR \cdot ED \cdot EF}{BW \cdot AT}$

Parámetros	Unidades	Niños			
		<2 años	2-17 años	Adultos >18 años	
C	Concentración de arsénico en el agua	mg/L			
IR	Tasa de ingesta del consumo de agua subterránea	L/día	1	1,25	2
ED	Duración de la exposición	años	2	17	77,9
EF	Frecuencia de exposición	365 días/años	365	365	365
BW	Peso corporal	Kg	10	30	70
AT	Promedio de vida	días	28434	28434	28434
	Carcinogénico ED*365	días	77,9*365		
NO-Carcinogénico ED*365	Promedio de vida	días	730	6205	28434
ADAF	Factor de ajuste dependiente de la edad	-	10	3	1
RfD	Dosis de referencia para la ingestión de arsénico	mg/kg/día		0,0003	
CSF	Factor de pendiente del cáncer para el arsénico	mg/kg/día ⁻¹		1,5	

Resultados



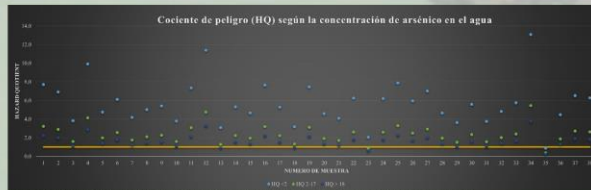
El 87 % de los pozos privados de agua potable estudiados tienen niveles As superiores a 0,010 mg/L (Recomendado para OMS)



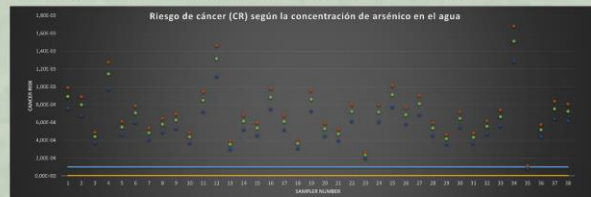
Georeferenciación de los pozos de agua muestreados con los niveles de arsénico representado con puntos calientes

Resultados de la encuesta

El 71% de las personas encuestadas han estado viviendo allí por más de 25 años. El 58% dice que consume el agua de pozo normalmente. 75% bebe mate, 100% usa agua de pozo para prepararlo. 100% utiliza esta agua de pozo para cocinar.



Valores de HQ calculados a partir de los niveles de arsénico en las muestras de agua estudiadas en diferentes rangos etarios



Valores de CR calculados a partir de los niveles de arsénico en las muestras de agua estudiadas en diferentes rangos etarios

Solo 4 pozos mostraron niveles de As que no presentaban ningún riesgo para la población adulta que bebe el agua, mientras que solo 2 pozos presentaban niveles de As no problemático para la población pediátrica.

La RC fue superior a 10⁻⁴ en los diferentes estratos etarios exceptuando un solo nivel de As, por lo que el los pozos no son seguros y la población tiene riesgo de cáncer.

Conclusiones

Aunque los valores superan ligeramente lo recomendado por la OMS, existen riesgos asociados.

Se concluye que en al menos 37 de los 38 pozos estudiados existe un riesgo sistémico de padecer enfermedades relacionadas con la exposición crónica "As" si sus habitantes continúan consumiendo agua con las concentraciones de As determinadas en este estudio.

Estos resultados mostraron que se deben llevar a cabo más estudios que vinculen los niveles de agua subterránea y el consumo de la población rural para abordar la evaluación de riesgos y la gestión de la salud, incluida la biomonitorización de "As" en orina de población expuesta.

Agradecimientos



II Simposio de Arsénico en agua subterránea del Uruguay



Se deja constancia que el trabajo

Título: Estudio de los niveles de arsénico en aguas subterráneas utilizadas para el consumo humano; Aportes de la Toxicología Ambiental con una mirada de Geología Médica

Autores: Paulina Pizzorno, Valery Bühl, Virginia Strambini, Paula Collazo, Nelly Mañay

fue presentado en forma poster por **Paulina Pizzorno** en el II Simposio de Arsénico en agua subterránea del Uruguay el 8 de noviembre de 2022.

Dra. Nelly Mañay
Comité Organizador

Dra. Paula Collazo
Presidente, Comité Organizador

Trabajo presentado el 16 de noviembre de 2022 en charla abierta, titulada “AGUA SUBTERRÁNEA: CALIDAD, GESTIÓN Y PROTECCIÓN EN SAN PEDRO” en la Escuela N°13 Piedra de Los Indios, localidad de San Pedro, Departamento de Colonia.

Trabajo presentado el 30 de octubre de 2021 en charla abierta, titulada “CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS, SAN PEDRO, COLONIA” en Camping Parque Brisas del Plata, localidad de San Pedro, Departamento de Colonia.